

- 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 Канпинович 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 Юревна Васильева, инженер издательско-полиграфического сектора, ВИТИ НИЯУ МИФИ, Российская Федерация

| | |
|--|---|
| Регистрация СМИ | Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 11 ноября 2011 года (Свидетельство ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г. – печатное издание). Первый номер журнала вышел в декабре 2011 года |
| Периодичность | 4 номера в год |
| Учредитель и издатель | Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» |
| Адрес редакции | 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31 |
| Типография | ВИТИ НИЯУ МИФИ, 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94 |
| Сайт | https://glonucsec.elpub.ru |
| Тираж | 100 экз. |
| Распространение | Распространяется бесплатно |
| Выход в свет: | 22.12.2025 |
| Знаком информационной продукции не маркируется | |



National Research Nuclear University MEPhI

Nuclear Safety

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

Vol. 15, No. 4, 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

Yuriy 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

Reg. № FS77-47155, November, 3 2011

Quarterly

Founder and Publisher

Editorial address

Printing house

Website

The circulation is

Subscription

Signed for printing:

It is not marked with an informational product sign

National Research Nuclear University MEPhI

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation

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

<https://glonucsec.elpub.ru>

100 copies

Free distribution

22.12.2025



Moscow

National Research Nuclear University MEPhI, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Том 15, № 4 (57), 2025

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

| | |
|---|----|
| Использование оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ на борту атомных плавучих энергоблоков российского дизайна <i>А.В. Просянов, М.П. Лац, С.М. Брыкалов, Н.А. Сальникова, А.Е. Лазарев, В.В. Мальев, Т.А. Тагирова, А.С. Чижов</i> | 5 |
| Роботизированная система для выполнения химических синтезов с анализом продуктов <i>Н.Ю. Серов, М.Ш. Адыгамов, А.О. Голубь, Т.Р. Гимадиев</i> | 19 |
| Распределение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в городах Кавказских Минеральных Вод Ставропольского края Российской Федерации <i>Е.А. Бураева, В.А. Бобылев, И.В. Шишов, В.И. Ратушный</i> | 30 |

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

| | |
|---|----|
| Технические решения и технологические методы повышения эффективности сепараторов-пароперегревателей в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 <i>В.М. Терехов, Л.И. Миронова, М.Ю. Хижев</i> | 37 |
| Расчетное моделирование выгорающих поглотителей на основе бенчмарка уранового и смешанного уран-плутониевого топлива ВВЭР-1000 <i>К.В. Кириллов, П.В. Ахметова, В.В. Семешин, Я.Д. Столотнюк</i> | 48 |
| Анализ сварочного производства корпусных изделий энергетического машиностроения <i>М.Е. Жидков</i> | 58 |

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

| | |
|--|----|
| Нейтронно-шумовой анализ вибрационного состояния тепловыделяющих сборок пятого поколения <i>Г.В. Аркадов, М.Т. Слепов</i> | 64 |
| Идентификация текущих состояний главных циркуляционных насосов АЭС <i>В.Г. Бекетов, В.Я. Шпицер</i> | 78 |
| Разработка специального программного обеспечения для организации и оценки характеристик источника сигнала в техническом канале утечки информации за счет электромагнитного излучения кабеля видеосистемы <i>Б.А. Красильников, А.А. Евстифеев, Д.Б. Николаев</i> | 86 |

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

| | |
|--|-----|
| Региональная модель кадрового обеспечения компаний топливно-энергетического комплекса <i>Н.К. Савельева, А.А. Созинова, М.В. Макарова</i> | 94 |
| Обучение англоязычной научно-технической терминологии в контексте подготовки специалистов для атомной отрасли <i>И.В. Зарочинцева, Л.В. Захарова, Ю.А. Лупиногина, О.А. Кикинчук, Н.В. Бунамес</i> | 107 |
| Авторский указатель номера 4 (57), 2025..... | 116 |

CONTENTS

Vol. 15, No 4, 2025

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

| | |
|--|----|
| Use of the IAEA containment and surveillance measures equipment at Russian-design nuclear floating power units <i>A.V. Prosyanyan, M.P. Lats, S.M. Brykalov, N.A. Salnikova, A.E. Lazarev, V.V. Malev, T.A. Tagirova, A.S. Chizhov</i> | 5 |
| Robotic system for performing chemical synthesis with analysis of products <i>N.Yu. Serov, M.Sh. Adygamov, A.O. Golub, T.R. Gimadiev</i> | 19 |
| Distribution of ambient equivalent dose of gamma radiation in the cities of the Caucasian Mineral Waters Stavropol Region Russian Federation <i>E.A. Buraeva, V.A. Bobylev, I.V. Shishlov, V.I. Ratushnyj</i> | 30 |

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

| | |
|--|----|
| Engineering solutions and process methods to increase the efficiency of moisture separator-reheaters being an equipment part of NPPs with VVER-1000 and VVER-1200 <i>V.M. Terekhov, L.I. Mironova, M.Yu. Khizhov</i> | 37 |
| Calculational modeling of burnable absorbers based on the benchmark of uranium and mixed uranium-plutonium VVER-1000 fuel <i>K.V. Kirillov, P.V. Akhmetova, V.V. Semishin, Y.D. Stolotnyuk</i> | 48 |
| Welding production analysis of power engineering housing products <i>M.E. Zhidkov</i> | 58 |

OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

| | |
|--|----|
| Neutron noise analysis of the vibration state of fifth-generation fuel assemblies <i>G.V. Arkadov, M.T. Slepov</i> | 64 |
| Identification of current states of the main circulation pumps at NPPs <i>V.G. Beketov, V.Ya. Shpitser</i> | 78 |
| Development of special software for organization and evaluation the characteristics of the signal source in the TEMPEST channel due to electromagnetic radiation from from the video system cable <i>B.A. Krasilnikov, A.A. Evstifeev, D.B. Nikolaev</i> | 86 |

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

| | |
|---|-----|
| Regional model of staffing for fuel and energy companies <i>N.K. Savelieva, A.A. Sozinova, M.V. Makarova</i> | 94 |
| Teaching English scientific and technical terminology in the context of training specialists for the nuclear industry <i>I.V. Zarochintseva, L.V. Zakharova, Yu.A. Lupinogina, O.A. Kikinchuk, N.V. Bunames</i> | 107 |
| Author Index of 4, 2025..... | 116 |

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-01>






УДК [621.039.577+623.828.8]:341.29

EDN AGGJEL

Оригинальная статья / Original paper



Использование оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ на борту атомных плавучих энергоблоков российского дизайна

А.В. Просянов, М.П. Лац, С.М. Брыкалов , Н.А. Сальникова , А.Е. Лазарев,
В.В. Мальев , Т.А. Тагирова , А.С. Чижов  ✉

Госкорпорация «Росатом», г. Москва, Российская Федерация

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

✉ chijov_as@okbm.nnov.ru

Аннотация. В настоящее время осуществляется разработка инновационного экспортоориентированного проекта атомного плавучего энергоблока, в том числе с точки зрения применения гарантий МАГАТЭ с учетом опыта эксплуатации на наземных атомных станциях с водо-водяными реакторами. Принимая во внимание технические особенности проекта атомного плавучего энергоблока и обращение с ядерным материалом, требуется адаптация существующих подходов по применению гарантий МАГАТЭ к этому судну. Ключевым аспектом предотвращения необнаруженного доступа к ядерному материалу является использование оборудования мер сохранения и наблюдения. Соответственно целью статьи является проработка возможного подхода по применению гарантий МАГАТЭ к атомному плавучему энергоблоку с точки зрения установки оборудования мер сохранения и наблюдения. При разработке подхода к применению гарантий МАГАТЭ учитываются жизненный цикл атомного плавучего энергоблока, особенности обращения с ядерным материалом, возможность мобильности объекта. Для достижения высокого уровня проработки подхода в части аспектов применения гарантий используется метод сравнения с аналогичными подходами для наземных атомных станций большой мощности. Рассмотрены особенности обращения с ядерным материалом на атомном плавучем энергоблоке, направленные на минимизацию рисков распространения ядерных материалов. Сформирован перечень оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ, которое может быть использовано на борту атомного плавучего энергоблока с учетом особенностей его эксплуатации. По результатам анализа можно заключить, что схема использования оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ на борту атомного плавучего энергоблока значительно проще, чем на наземных атомных станциях большой мощности. Эта схема может быть своевременно учтена уже на этапе технического проектирования, что упростит установку и использование оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ.

Ключевые слова: ПЭБ, МАГАТЭ, обращение с ядерным материалом, АЭС, нераспространение, сохранение и наблюдение, гарантии.

Для цитирования: Просянов А.В., Лац М.П., Брыкалов С.М., Сальникова Н.А., Лазарев А.Е., Мальев В.В., Тагирова Т.А., Чижов А.С. Использование оборудования мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ на борту атомных плавучих энергоблоков российского дизайна. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):5–18.

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-01>

For citation: Prosyantov A.V., Lats M.P., Brykalov S.M., Salnikova N.A., Lazarev A.E., Malev V.V., Tagirova T.A., Chizhov A.S. Use of the IAEA containment and surveillance measures equipment at Russian-design nuclear floating power units. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):5–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-01>

Use of the IAEA containment and surveillance measures equipment at Russian-design nuclear floating power units

Alexey V. Prosyantov, Maksim P. Lats, Sergey M. Brykalov , Nadezhda A. Salnikova ,
Alexander E. Lazarev, Vladimir V. Malev , Tatyana A. Tagirova , Andrey S. Chizhov  ✉

Rosatom State Corporation, Moscow, Russian Federation

Afrikanov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

✉ chijov_as@okbm.nnov.ru

Abstract. Currently, an innovative export-oriented project of a nuclear floating power unit is being developed including from the point of view of the application of IAEA safeguards taking into account the experience of operation at land-based nuclear power plants with water-cooled reactors. According to the design technical features of a nuclear floating power unit and the handling of nuclear material, it is necessary to adapt the existing approaches to the application of the IAEA safeguards to this vessel. A key aspect of controlling unauthorized removal of nuclear material is the use of containment and surveillance equipment. Therefore, the article objective is to study a possible approach to the application of the IAEA safeguards to a nuclear floating power unit in terms of installing equipment for containment and surveillance measures. When developing an approach to the application of the IAEA safeguards, the following are taken into account: the life cycle of an atomic floating power unit; peculiarities of nuclear material handling; possibility of object mobility. To achieve a high level of elaboration of the approach in terms of aspects of the application of safeguards, a comparison method is used with similar approaches for land-based nuclear power plants of large capacity. Peculiarities of nuclear material handling at nuclear floating power unit aimed at minimization of nuclear materials proliferation risks are considered. A list of the IAEA containment and surveillance equipment has been compiled, which can be used on the nuclear floating power unit board taking into account the specifics of its operation. Based on the results of the analysis, it can be concluded that the scheme of using the IAEA containment and surveillance equipment on the nuclear floating power unit board is much simpler than at land-based nuclear power plants of high capacity. This scheme can be taken into account in a timely manner already at the stage of detailed design, which will simplify the installation and use of the IAEA containment and surveillance equipment already at the operating facility.

Keywords: FPU, IAEA, nuclear material handling, NPP, non-proliferation, containment and surveillance, safeguards.

Введение

Атомный плавучий энергоблок (далее – ПЭБ) – инновационная разработка российской атомной отрасли является самоходным судном, которое перемещается с помощью буксира или судна-дока. ПЭБ предназначен для энергоснабжения широкого круга потребителей, нуждающихся в электроэнергии или тепле. Госкорпорация «Росатом» разрабатывает несколько проектов ПЭБ различной конфигурации, отличающихся типом используемого топлива, мощностью реакторных установок и техническим оснащением, адаптированным к тропическим или арктическим районам размещения.

Для реализации на зарубежных площадках предполагается проект ПЭБ-100 мощностью 100 МВт, предназначенный для эксплуатации в прибрежных или удаленных от центральных энергосетей районах, где строительство наземных атомных станций (далее – АЭС) малой или большой мощности нецелесообразно. Проектом ПЭБ-100 интересуются страны Юго-Восточной Азии, Ближнего Востока и Африки. При размещении за пределами Российской Федерации вопросы ядерного нераспространения приобретают первостепенное значение, поскольку судно, как правило, планируется к эксплуатации в странах, не обладающих ядерным оружием, по смыслу Договора

о нераспространении ядерного оружия (далее – ДНЯО).

ПЭБ-100 представляет собой следующее поколение плавучих энергоблоков, разработанное с учетом опыта эксплуатации ПЭБ «Академик Ломоносов» на Крайнем Севере Российской Федерации. На ПЭБ-100 установлены реакторные установки РИТМ-200М, являющиеся дальнейшим развитием интегральных судовых реакторных установок РИТМ-200, успешно применяемых на универсальных атомных ледоколах проекта 22220. В отличие от ПЭБ «Академик Ломоносов», ПЭБ-100 не имеет перегрузочного оборудования и хранилища ядерных материалов на борту. Ключевой особенностью ПЭБ-100 является использование в составе реактора топлива с обогащением урана-235, соответствующего требованиям МАГАТЭ по экспорту гражданских энергетических реакторов и топлива для них. Все операции с ядерным материалом будут проводиться исключительно в Российской Федерации на специализированных предприятиях, обладающих необходимой инфраструктурой, что минимизирует риски распространения ядерных материалов.

Проект ПЭБ-100 отличается мобильностью и предусматривает возможность смены места эксплуатации по истечении срока договора на энергообеспечение определенного региона без необходимости внесения изме-

нений в конструкцию. Мобильность и отсутствие доступа к ядерному материалу за пределами Российской Федерации обуславливают необходимость адаптации подходов к применению гарантий МАГАТЭ, включая применение оборудования мер сохранения и наблюдения со стороны МАГАТЭ.

Жизненный цикл ПЭБ-100

Жизненный цикл ПЭБ включает в себя следующие этапы: проектирование, строительство, транспортирование, ввод в эксплуатацию, эксплуатацию и вывод из эксплуатации. На этапе проектирования ПЭБ учитываются требования к безопасности и экологической защите, а также необходимость функционирования в различных климатических условиях [1].

Согласно модели «Энергофлот» строительство ПЭБ-100, загрузка и последующие перегрузки топлива, а также обслуживание судна осуществляются на территории Российской Федерации. Передача ядерного материала стране размещения ПЭБ-100 не производится. Доступ страны размещения к ядерному топливу ПЭБ-100 исключен. При проектировании учитываются принцип «Устойчивость с точки зрения нераспространения» (Proliferation resistance) и принцип «Учет гарантий МАГАТЭ на стадии проектирования» (SBD, safeguards-by-design). Это позволяет учитывать требования к гарантиям МАГАТЭ на стадии проектирования, сооружения, эксплуатации и вывода объекта из эксплуатации. Цель учета гарантий МАГАТЭ на стадии проектирования – содействие разработке мер сохранения и наблюдения, что позволит сократить до минимума негативное воздействие на оператора и инспектора, не снижая эффективности системы гарантий, улучшить доступ к оборудованию для его технического обслуживания, обеспечить возможность дистанционной передачи данных на площадке. Эти принципы обеспечивают устойчивость ядерного объекта с точки зрения ядерной радиационной безопасности [2].

Для определения возможности постановки ядерного объекта под гарантии и оценки

степени защищенности ядерного объекта гарантиями МАГАТЭ используется подход «Safeguardability», который означает то, насколько легко и эффективно ядерная установка может быть поставлена под гарантии. Применяемые технические и эксплуатационные решения в рамках проекта ПЭБ-100 позволяют сделать вывод о высокой степени «Safeguardability», что обусловлено ограниченным доступом к ядерному материалу в стране размещения, не обладающей ядерным оружием, а также особой компоновкой ПЭБ-100 и другими факторами.

В процессе эксплуатации проектов ПЭБ осуществляется регулярное техническое обслуживание, замена отработавшего ядерного топлива и контроль за безопасностью работы реакторной установки. Загрузка и выгрузка топлива осуществляются непосредственно с борта ПЭБ-100. Перемещение топлива при загрузке происходит через внешние люки в помещение люков и далее через люки аппаратных в аппаратные [3].

В помещении люков проводится визуальный осмотр топлива и проверка его соответствия документации производителя. После загрузки топлива крышка реактора закрывается и герметизируется. Люки аппаратных также закрываются и герметизируются. Далее ПЭБ-100 перевозится в страну размещения и эксплуатируется до окончания топливной кампании, после чего возвращается в Российскую Федерацию для обслуживания и перегрузки [4].

Техническое обслуживание ПЭБ-100 и обращение с топливом планируется осуществлять исключительно в Российской Федерации. Это обусловлено конструктивными особенностями помещений ПЭБ-100, реакторной установки и условиями эксплуатации активной зоны реактора, особенностями эксплуатации перегрузочного комплекса в Российской Федерации. Люки аппаратных могут быть вскрыты и доступ к топливу может быть получен только в Российской Федерации с использованием специализированного перегрузочного оборудования, имеющегося только на специали-

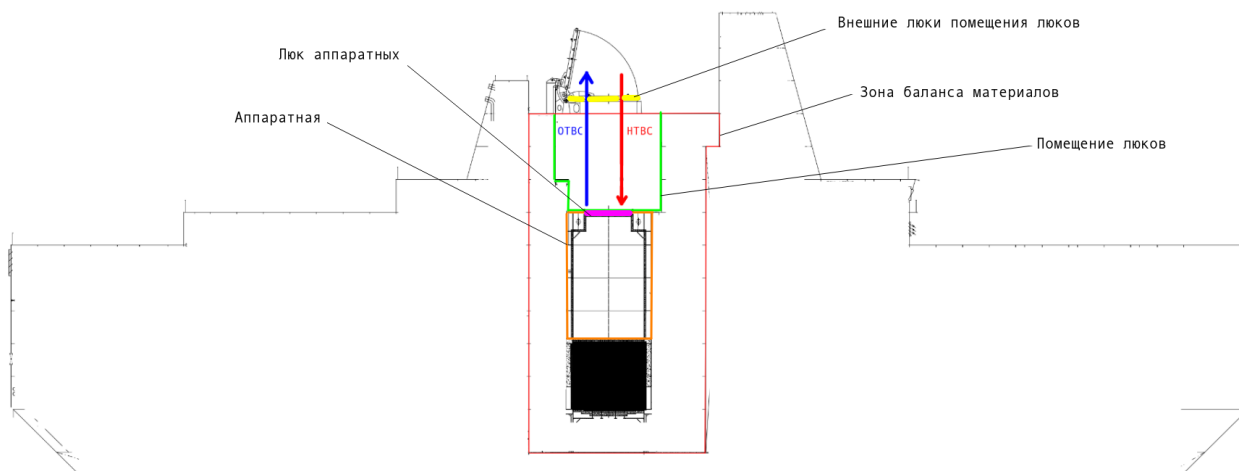


Рисунок 1. Общее расположение оборудования мер сохранения и наблюдения: НТВС – новая тепловыделяющая сборка, ОТВС-отработавшая тепловыделяющая сборка¹

Figure 1. General arrangement of equipment for containment and surveillance measures: NFA - new fuel assembly, SFA-spent fuel assembly¹

зированных предприятиях в Российской Федерации.

Выгрузка топлива осуществляется по тому же маршруту, что и загрузка, но в обратном направлении. Топливо выгружается из реактора с помощью специализированного контейнера через люки аппаратных, затем через помещение люков и покидает борт через внешние люки помещения люков. Доступ к отработавшему топливу в момент выгрузки и после нее на борту ПЭБ-100 исключен. В другие помещения ПЭБ-100, за пределы помещения люков и аппаратной, топливо не попадает, рисунок 1.

После завершения срока службы ПЭБ-100 начинается процесс вывода из эксплуатации. Он включает в себя выгрузку ядерного топлива, дезактивацию оборудования и демонтаж конструкции судна.

Описание деятельности МАГАТЭ

Согласно ст. 3 ДНЯО, МАГАТЭ применяет международные гарантии для проверки выполнения обязательств по нераспространению, которые государства, не обладающие ядерным оружием, взяли на себя

в соответствии с ДНЯО, «чтобы не допустить переключения ядерной энергии с мирного применения на ядерное оружие или другие ядерные взрывные устройства».

Устав МАГАТЭ (пп. 5 п. А ст. III) уполномочивает МАГАТЭ устанавливать и проводить в жизнь гарантии, имеющие своей целью обеспечить, чтобы специальные расщепляющиеся и иные материалы, услуги, оборудование, технические средства и сведения, предоставляемые МАГАТЭ, по его требованию или под его наблюдением или контролем, не были использованы таким образом, чтобы способствовать какой-либо военной цели [5]. МАГАТЭ осуществляет контроль переключения ядерного материала с использования в мирных целях на использование не по назначению (создание ядерного оружия), в том числе во время эксплуатации АЭС. Для этого Департамент гарантий Секретариата МАГАТЭ проводит проверочную деятельность в отношении ядерной установки, поставленной под гарантии МАГАТЭ.

ПЭБ-100 в силу своей судовой специфики и мобильности предполагает развитие комплексного подхода к реализации гарантий,

¹ Представлен модифицированный рисунок ПЭБ-100 в продольном разрезе, опубликованный в документе эскизного проекта ПЭБ-100 23870.360050.003 «Общее расположение ОПЭБ», ОПЭБ – оптимизированный плавучий энергоблок, предыдущее наименование ПЭБ-100.

учитывающего правовые и технические вопросы в различных сферах, включая межгосударственное взаимодействие в части ядерного нераспространения [6]. Правовое регулирование объекта оказывает непосредственное влияние на проектирование и техническую составляющую ПЭБ-100.

МАГАТЭ проводит плановые проверки строящихся энергетических объектов, а также прорабатывает алгоритмы проверки инновационных объектов, таких как ПЭБ-100, для обеспечения соблюдения всех норм, требований безопасности и гарантий МАГАТЭ. Эти проверки и инспекции направлены на обеспечение соблюдения международных правовых обязательств в области ядерного нераспространения, а также соответствия строящихся объектов международным нормам безопасности [7].

Деятельность МАГАТЭ играет важную роль при проектировании ядерных установок [8]. Одним из ключевых элементов применения гарантий МАГАТЭ к ядерному материалу или ядерной установке является применение мер сохранения и наблюдения (далее – С/Н) [9].

Оборудование мер сохранения и наблюдения МАГАТЭ и его применение на АЭС с водо-водяными реакторами

В соответствии со статьей 29 INFCIRC/153 (Corrected)² оборудование мер С/Н МАГАТЭ определены в качестве важных мер, которые дополняют материальный учет при выполнении главной цели гарантий: своевременное фиксирование доступа к ядерному материалу или его перемещение. Термин «наблюдение» в контексте гарантий МАГАТЭ определяется как инструментальный или человеческий сбор информации, которая будет использоваться для поддержания «непрерывности знания» о ядерном материале, системе сохранения, имуществе МАГАТЭ и деятельности на площадке для

указания или обнаружения изъятия ядерного материала. Термин «сохранение» означает обеспечение постоянного знания о ядерном материале путем предотвращения необнаруженного доступа к предметам или их перемещения, в том числе с точки зрения предотвращения необнаруженного доступа [10].

При выборе перечня оборудования для использования на конкретном объекте требуется учесть несколько факторов. Во-первых, это достаточность, эффективность и целесообразность используемого оборудования для идентификации предотвращения необнаруженного доступа к ядерному материалу. Это включает такие параметры, как:

- финансовая целесообразность использования оборудования мер С/Н;
- его подверженность износу и выходу из строя;
- своевременность и полнота зафиксированных им данных по обращению с ядерным материалом [11];
- отсутствие противоречий в работе с оборудованием, используемым эксплуатирующей организацией;
- отсутствие раскрытия чувствительной для объекта информации о его эксплуатации, либо об используемых технологиях, составляющих «know-how».

Во-вторых, это учет особенностей обращения с ядерным материалом на конкретном объекте, а также учет особенностей эксплуатации этого объекта. Это подразумевает:

- учет обеспечения электропитания оборудования мер С/Н;
- необходимость сохранения фиксируемых оборудованием данных по обращению с ядерным материалом на долгий срок;
- возможность удаленной передачи данных;
- возможность и целесообразность проверки работоспособности оборудования мер С/Н со стороны МАГАТЭ, а также снятие сотрудниками МАГАТЭ данных об обра-

² INFCIRC/153 (Corrected) The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons. – Режим доступа: https://www.iaea.org/sites/default/files/infirc153_rus.pdf (дата обращения: 08.07.2025).

нии с ядерным материалом, зафиксированных этим оборудованием.³

МАГАТЭ имеет широкий перечень оборудования мер С/Н. В перечень входят различные виды пломб, видеокамер, серверов, датчиков нейтронного потока / гамма излучения, камер по анализу эффекта Черенкова-Вавилова и так далее.

Самым простым устройством из оборудования мер С/Н МАГАТЭ является пломба. Пломбы применяются для обнаружения вскрытия тары, входов в помещения и так далее.

МАГАТЭ располагает разными типами пломб, в том числе механическими пассивного принципа действия (FVPS – Field Verifiable Passive Seal/ проверяемая на месте пассивная пломба, CAPS – metal cap sea) и активными с возможностью электронного фиксирования их вскрытия (AUAS – Active Universal Asymmetric Seal/ активная универсальная ассиметричная пломба, EOSS), рисунок 2. При этом пломба любого вида, как правило, состоит из двух частей: тела пломбы и кабеля. Одной из особенностей использования активных пломб МАГАТЭ является возможность удаленной передачи сигнала от пломб через датчик в МАГАТЭ, что позволяет круглосуточно отслеживать состояние пломб на конкретном объекте.

Пломбы, как и другое оборудование мер С/Н, не предотвращает несанкционированный доступ к ядерному материалу, но они фиксируют такой доступ. Их задача – это идентификация несанкционированных действий.

Проверка пассивных и активных пломб может осуществляться путем визуального осмотра, сверки номеров, проверки подлинности и отсутствия вскрытия тела и кабеля пломбы. Например, может быть использован метод микрофотографического сравнения.⁴



Рисунок 2. Электронная пломба⁵
Figure 2. Electronic seal⁵

Пломбы входят в список оборудования, не предполагающего постоянного присутствия инспектора по гарантиям МАГАТЭ. Кроме пломб в этот перечень также входят камеры видеонаблюдения и некоторые датчики нейтронного потока и гамма излучения.

Также МАГАТЭ использует различные системы видеонаблюдения. Особенности этого типа оборудования является возможность объединения устройств видеонаблюдения в одну единую систему с помощью сервера. Видеокамеры снимают отдельные кадры, а не полноценный видеоряд, что позволяет обеспечивать их долгую работу без замены записывающего устройства. К такому оборудованию относится камера NGSS (Next generation of surveillance system).

При очных визитах МАГАТЭ используется оборудование для идентификации ядерного материала при его загрузке/выгрузке в/из реактор(а). При этом большая часть этого оборудования является оборудованием неразрушающего принципа действия. Неразрушающий анализ – это метод измерения, применяемый к ядерному материалу для подтверждения его изотопного состава и количества без разрушения предметов. Одним из типов такого оборудования являются весы.

Другим вариантом такого оборудования является оборудование для проверки гамма-излучения при загрузке или выгрузке ядерного материала из реактора или хранилища топлива. Для проведения изотопного анали-

³ Материалы по оборудованию мер сохранения и наблюдения. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull19-5/19503402026.pdf> (дата обращения: 08.07.2025).

⁴ Документ о гарантиях МАГАТЭ. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull19-5/19503402026.pdf> (дата обращения: 08.07.2025).

⁵ Electronic optical seal. – Режим доступа: <http://www.canberra.com> (дата обращения: 08.07.2025).

за нужен непосредственный доступ к ядерному материалу и определенные тайминги для снятия показаний с образцов.

Для анализа свежего топлива могут использоваться датчики контроля гамма-излучения, например, НМ-5 (Hand held assay probe), рисунок 3.



Рисунок 3. Ручной зонд для анализа гамма излучения, НМ-5 [12]

Figure 3. Hand held assay probe for gamma radiation, HM-5 [12]



Рисунок 4. Система на основе германия с электрическим охлаждением, ECGS [12]

Figure 4. Electrically cooled germanium system, ECGS [12]

Для анализа отработавшего топлива могут использоваться также соответствующие датчики (рис. 4,5,6), например, IRAT (Irradiated fuel attribute tester), SFAT (Spent fuel attribute tester). Для обоих наименований оборудования требуется непосредственный доступ к отработавшему топливу.



Рисунок 5. Тестер характеристик облученного топлива, IRAT. Мини-многоканальный анализатор, MMCA [12]

Figure 5. Irradiated fuel attribute tester, IRAT. Mini-multi-channel analyzer, MMCA [12]

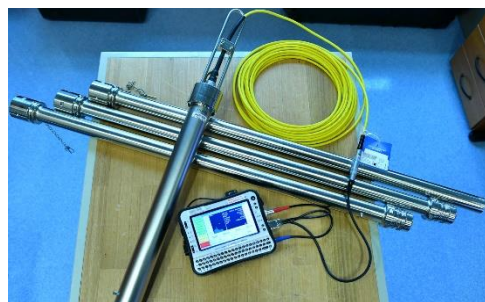


Рисунок 6. Прибор для проверки характеристик отработавшего топлива, SFAT [12]

Figure 6. Spent fuel attribute tester, SFAT [12]

Для исследования нейтронного потока МАГАТЭ использует полуавтономный датчик MUND (Mobile unit neutron detector). Этот датчик не требует непосредственного доступа к топливу, но при этом должно быть обеспечено, чтобы нейтронный поток от ядерного материала не глушился, в частности, биологической защитой реактора или оборудования перегрузочного комплекса.

Также МАГАТЭ использует оборудование мер С/Н для исследования излучения Вавилова-Черенкова XCVD (Next Generation Cherenkov Viewing Device), RCVD (Robotized Cherenkov Viewing Device). МАГАТЭ также используется ICVD (Improved Cherenkov viewing device) (рис. 7) для наиболее точной фиксации наличия отработавшего топлива в бассейнах хранения. Это оборудование проще в использовании по сравнению с оборудованием по исследованию гамма-излучения или нейтронного потока, но требует визуального доступа к ядерному материалу.



Рисунок 7. Усовершенствованный прибор для анализа свечения Черенкова, ICVD [12]

Figure 7. Improved Cherenkov viewing device, ICVD [12]

Весь перечисленный выше спектр оборудования мер С/Н МАГАТЭ широко применяется на наземных АЭС большой мощности.

Применение оборудования мер С/Н на наземных АЭС большой мощности на базе водо-водяных реакторов

На наземных АЭС большой мощности на базе водо-водяных реакторов применяется широкий спектр оборудования мер С/Н. Ключевыми аспектами использования оборудования мер С/Н для наземных АЭС являются:

– нахождение ядерного материала, как правило, сразу в нескольких помещениях объекта (хранилище свежего топлива, реакторный зал, бассейн отработавшего топлива, сухое хранилище);

– доступ к ядерному материалу во время эксплуатации объекта каждые 1–1,5 года топливных перегрузок;

– перемещение топлива между помещениями;

– хранение ядерного материала на объекте.

На рисунке 8 представлена обобщенная схема использования оборудования мер С/Н МАГАТЭ на наземных АЭС большой мощности на базе водо-водяных реакторов с учетом движения ядерного материала [13].

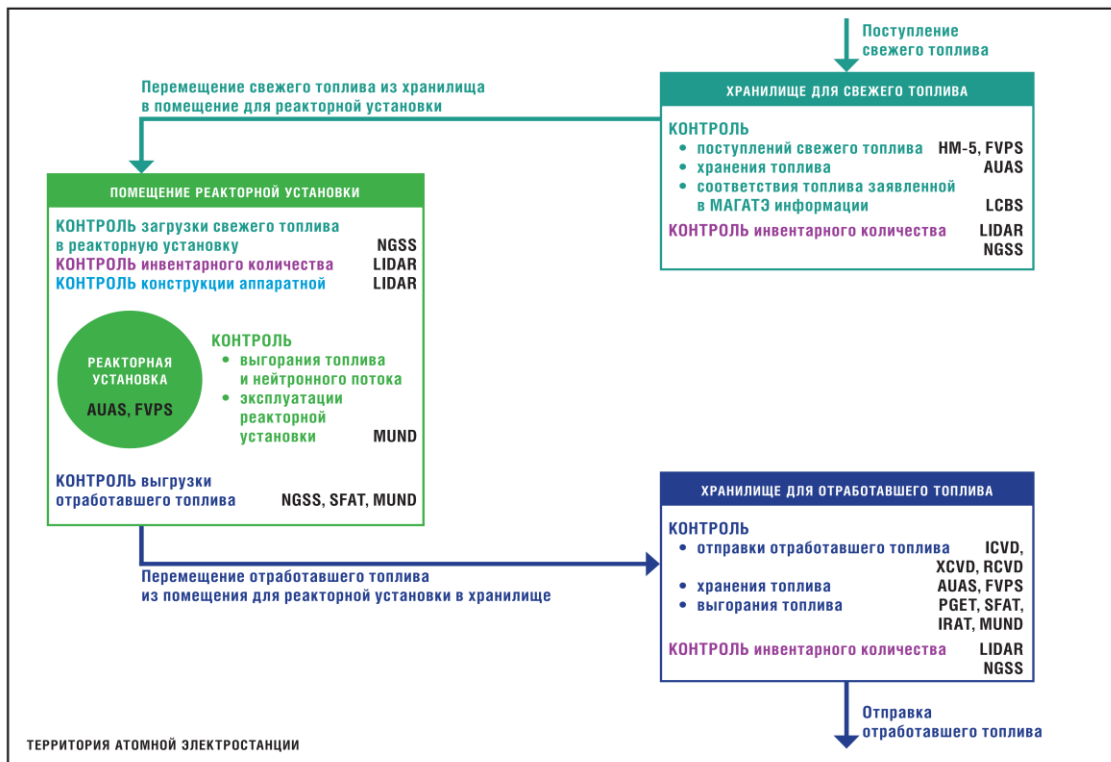


Рисунок 8. Пример схемы контроля ядерного материала на территории АЭС на предмет предотвращения необнаруженного доступа [составлено авторами]

Figure 8. Example of a scheme for monitoring nuclear material on the territory of nuclear power plants to prevent undetected access [compiled by the authors]

В частности, на наземных АЭС большой мощности с водо-водяными реакторами одновременно может использоваться оборудование XCVD, IRAT или SFAT для проверки отработавшего топлива с возможностью выявления дефектов.

Для верификации ядерного материала могут использоваться комбинации приборов по исследованию эффекта Вавилова-Черенкова (XCVD/RCVD). Для использования оборудо-

вания по исследованию эффекта Вавилова-Черенкова не требуется специальной инфраструктуры на АЭС с водо-водяными реакторами [14].

Также на объектах на базе водо-водяных реакторов могут применяться активные пломбы с оптической электронной системой с целью фиксации отсутствия доступа во время работы реактора.

Для проверки тепловыделяющих сборок и закрытых контейнеров на объектах на базе водо-водяных реакторов может использоваться установка пассивной гамма-эмиссионной томографии (Passive Gamma Emission Tomography – PGET) – прибор неразрушающего анализа. Гамма-излучение, которое проявляется в отработавшем топливе, фиксируется сигналами детекторов CdZnTe, которые подтверждают наличие отдельных облученных ТВЭЛОВ.

С точки зрения видеонаблюдения могут использоваться камеры NGSS (Next generation of surveillance system), рисунок 9, для визуального охвата всей зоны хранения ядерного материала.



Рисунок 9. Единичная камера системы наблюдения следующего поколения [12]

Figure 9. Single next generation of surveillance system camera [12]

Для контроля состояния отработавшего топлива, в том числе в бассейнах хранения, может использоваться система подводной съемки – UWTV (underwater television system), рисунок 10.



Рисунок 10. Подводная телевизионная система (UWTV) [12]

Figure 10. Underwater television (UWTV) system [12]

МАГАТЭ применяет оборудование (LCBS – load cell based weighing system), рисунок 11, для измерения веса массивных объектов, такие как транспортные баллоны UF-6, используемые для хранения гексафторида урана.



Рисунок 11. Система взвешивания на основе тензодатчиков, LCBS [12]

Figure 11. Load cell-based weighing system, LCBS [12]

Также на ядерных объектах с водо-водяными реакторами могут использоваться системы LIDAR. С ее помощью можно зафиксировать несанкционированный доступ к ядерному материалу путем сканирования пространства. Для этого внутри зоны баланса материалов монтируются устройства, оснащенные лазерными сканерами.

В рамках наземных АЭС большой мощности на базе водо-водяных реакторов может применяться «двойная система оборудования мер С/Н», при которой каждый вероятный путь несанкционированного использования ядерного материала идентифицируется двумя устройствами мер С/Н, которые между собой независимы, работают по разному принципу и не подвержены режиму одновременного отказа. Например, два различных типа пломб или пломбы с использованием видеонаблюдения или лазерным сканированием объема помещения. Таким образом, некорректная работа одного типа оборудования мер С/Н компенсируется сохранением работоспособности другого оборудования мер С/Н.

Как для целей контроля наземных АЭС, так и мобильных объектов или грузов постоянно появляются разработки оборудования мер сохранения и наблюдения разного принципа действия, например, контроль источников нейтрино, что теоретически может позволить осуществлять контроль за ядерным материалом без прямого к нему доступа [15].

Применение оборудования мер С/Н на атомном плавучем энергоблоке (ПЭБ-100)

Особенности жизненного цикла ПЭБ-100 определяют специфику использования оборудования мер С/Н на его борту, рисунок 12. Этими аспектами являются:

– особый маршрут движения ядерного материала, который предполагает движение по прямой линии через одно сквозное поме-

щение (помещение люков) и в одно тупиковое помещение (аппаратная);

– отсутствие хранилищ для ядерного материала на борту ПЭБ-100;

– отсутствие доступа к ядерному материалу во время эксплуатации ПЭБ-100 в стране размещения, не обладающей ядерным оружием.

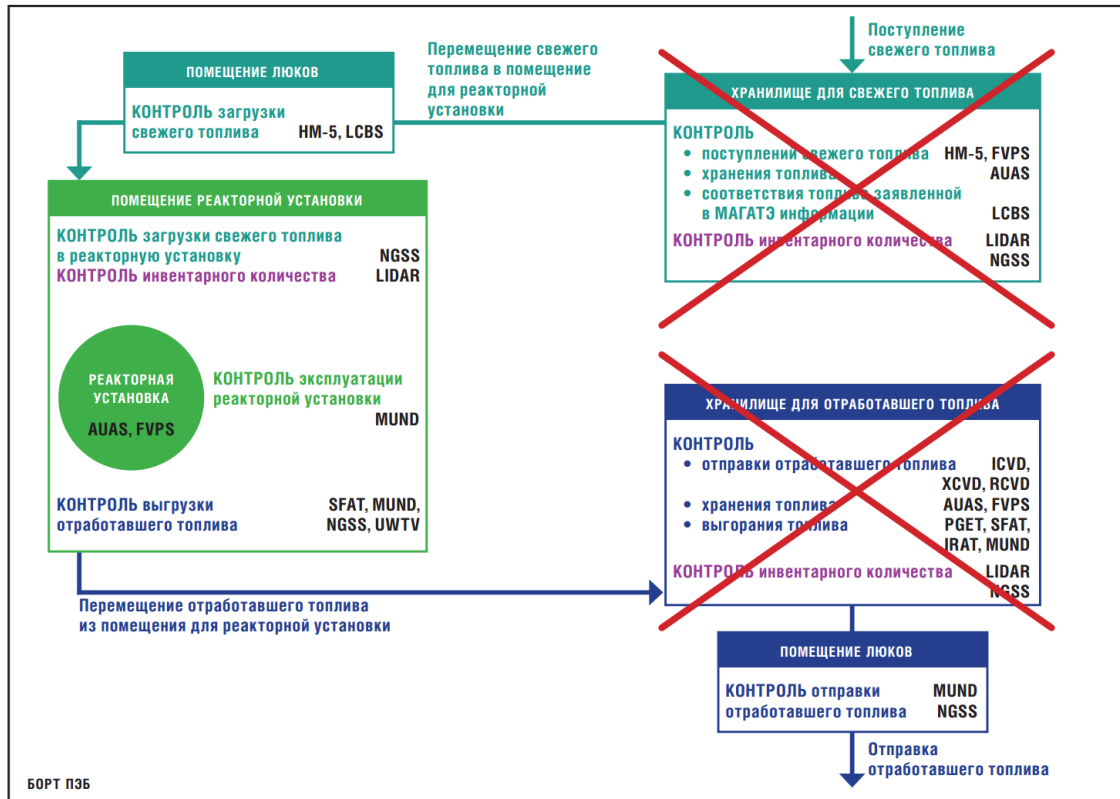


Рисунок 12. Пример схемы контроля ядерного материала на борту ПЭБ-100 по сравнению с наземной АЭС большой мощности на предмет предотвращения необнаруженного доступа к ядерному материалу [составлено авторами]

Figure 12. Example of a scheme for monitoring nuclear material on board a FPU-100 compared to a high capacity land-based NPP to prevent undetected access to nuclear material [compiled by the authors]

В случае ПЭБ-100 использование ядерного материала на борту и путь его движения прямолинейны по сравнению с наземной АЭС большой мощности на базе водородных реакторов. Ядерный материал с технической и регламентной точки зрения может находиться только в реакторе для целей его использования. Процедуры, связанные с его обращением в помещении люков и в аппаратной, связаны только с загрузкой и выгрузкой и не могут быть связаны ни с чем иным, кроме как с движением ядерного материала по маршруту: береговые сооружения – борт ПЭБ-100 – реакторная

установка; реакторная установка – борт ПЭБ-100 – береговые гидротехнические сооружения.

Таким образом, топливо на ПЭБ-100 движется только по одной линии. Компонровка ПЭБ-100 не предполагает перемещение топлива в другие помещения кроме аппаратной и помещения люков. Учитывая компоновку аппаратной и технологические процессы, связанные с обращением с ядерным материалом, описанные выше, представляется возможным установить точку контроля оборудованием мер С/Н МАГАТЭ только на люках аппаратных.

Наиболее подходящим для перманентного использования на ПЭБ-100 оборудованием из состава оборудования мер С/Н МАГАТЭ представляются электронные (активного принципа действия) и механические (пассивного принципа действия) пломбы. Это обусловлено рядом технических параметров:

- активные пломбы не требуют электропитания с борта ПЭБ-100 по сравнению с видеокамерами и датчиками нейтронного потока, которые требуют обеспечение электропитания, обеспечение сохранения фиксируемых ими данных и таким образом несут потенциальный риск потери преемственности знаний о ядерном объекте;

- механические пломбы не требуют регулярного снятия фиксируемой ими информации по сравнению с другим оборудованием мер С/Н, которые собирают большой объем информации и требуют периодического очищения средств сохранения информации с учетом ограниченного объема этих средств и возможного отсутствия доступа к судну, в том числе по причине его удаленности либо нахождения в процессе транспортировки;

- при использовании активных пломб не представляется критичной удаленная передача информации об их работе.

Учитывая, что вскрытие люков аппаратных в стране размещения не предусмотрено, пломбы МАГАТЭ напрямую будут фиксировать отсутствие вскрытия люков аппаратных на протяжении периода от загрузки топлива и до его выгрузки на территории Российской Федерации. Другое оборудование мер С/Н, включая видеокамеры и датчики нейтронного потока / гамма-излучения, может только косвенно фиксировать вскрытие люков аппаратных.

При загрузке топлива со стороны МАГАТЭ представляется возможным использовать оборудование мер С/Н в части измерения гамма-излучения свежего топлива, например, при помощи гамма датчика НМ-5. Использование этого датчика вместе с мерами по проверке со стороны МАГАТЭ заводских маркировок и других данных свежего топлива позволит сформировать пред-

ставление о его изотопном составе и оригинальности.

Выгрузка осуществляется в государстве, обладающим ядерным оружием, и топливо остается в нем на переработку и захоронение. В случае срыва пломб МАГАТЭ может осуществить проверку топлива до его выгрузки путем визуального осмотра маркировок ТВС до их выгрузки.

Также МАГАТЭ может использовать датчики нейтронного потока и гамма излучения для контроля выхода отработавшего топлива за пределы ПЭБ-100.

Заключение

Особенности эксплуатации и технические аспекты конструкции и обращения с топливом ПЭБ-100 позволяют сделать основной упор на оборудовании мер С/Н без снижения их эффективности. По результатам анализа предложен подход по возможному использованию пломб МАГАТЭ и местам их расположения. Оборудование мер С/Н, которое представляется возможным использовать на борту ПЭБ-100, уже используется на АЭС с водо-водяными реакторами.

Представленный в статье вариант постановления ПЭБ-100 под гарантии МАГАТЭ с точки зрения оборудования мер С/Н является одним из возможных вариантов. Окончательный вариант постановления ПЭБ-100 под гарантии МАГАТЭ будет определен по результатам договоренностей с МАГАТЭ на этапе постановки объекта под гарантии и будет обозначен в специальном документе – Приложении по установке.

Выполненный анализ показывает, что с точки зрения применения гарантий МАГАТЭ ПЭБ-100 имеет конструктивно меньше точек контроля по сравнению с наземной АЭС большой мощности. Это объясняется отсутствием в рамках ПЭБ-100 инфраструктуры, требующей контроля с точки зрения нераспространения. Существующий подход по предотвращению необнаруженного доступа к ядерному материалу на наземных АЭС большой мощности представляется возможным оптимизировать и упростить. Это показывает высокий уровень ПЭБ-100 с точки зрения принципа «Safeguardability».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Райнарц Д. Атомоход Otto Hahn: использование ядерной энергии для морских грузоперевозок. *Атомная техника за рубежом*. 2014;5:28–29. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-tehnika-za-rubezhom_2014_v5/p29/ (дата обращения: 12.07.2025).

Rajnartcz D. Atomohod Otto Hahn: ispol'zovanie yadernoj e`nergii dlya morskix gruzoperevozok. *Atomnaya tekhnika za rubezhom*. 2014;5:28–29. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-tehnika-za-rubezhom_2014_v5/p29/ (accessed: 12.08.2025).

2. Алексеев П.Н., Удянский Ю.Н., Щепетина Т.Д. Атомные станции малой мощности – главный путь снижения рисков и их последствий в ядерной энергетике. *Атомная энергия*. 2019;126(4):194–198. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2548/2849> (дата обращения: 12.07.2025).

Alekseev P.N., Udyanskii Yu.N., Shchepetina T. D. Small nuclear power plants – primary avenue for reducing risks and their consequences in nuclear power. *Atomic energy*. 2019;126(4):194–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00540-2>

3. Whitlock J., Sprinkle J. Proliferation resistance considerations for remote small modular reactors. *AECL nuclear review*. 2012;1(2):9–12. Available at: https://www.researchgate.net/publication/275497676_Proliferation_Resistance_Considerations_for_Remote_Small_Modular_Reactors (accessed: 12.08.2025).

4. Душев С.А., Тимофеев А.В., Ермаков А.В., Данилов С.Д., Плотников И.В., Абросимов А.Д. Создание и развитие комплексов и оборудования перезарядки судовых и корабельных реакторных установок. *Атомная энергия*. 2020;129(2):88–95. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3441/4500> (дата обращения: 14.07.2025).

Dushev S.A., Timofeev A.V., Ermakov A.V. et al. Refueling complexes and equipment for civilian and naval ship reactor installations: creation and development. *Atomic energy*. 2020;129:80–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00716-9>

5. Устав Международного агентства по атомной энергии. Режим доступа: https://www.iaea.org/sites/default/files/statute_rus.pdf (дата обращения: 12.08.2025).

Statute of the International Atomic Energy Agency. Available at: <https://www.iaea.org/about/statute> (accessed: 12.08.2025).

6. Лысенко М.Н. Международное ядерное право – это отрасль международного права? *Московский журнал международного права*. 2016;(4):11–20. Режим доступа: <https://www.mjil.ru/jour/article/view/196> (дата обращения: 12.08.2025).

Lysenko M.N. Is the International Nuclear Law a Separate Branch of International Law? *Moscow Journal of International Law*. 2016;(4):11–20. (In Russ.). Available at: <https://www.mjil.ru/jour/article/view/196> (accessed: 12.08.2025).

7. Невиница В.А., Родионова Е.В., Марова Е.В. МАГАТЭ на АЭС с быстрым реактором и пристанционным топливным циклом. *Атомная энергия*. 2021;131(2):101–106. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4657/5074> (дата обращения: 12.08.2025).

Nevinitsa V.A., Rodionova E.V., Marova E.V. Technical and Economic Features of IAEA safeguards application at NPPs with a fast reactor and on-site fuel cycle. *Atomic energy*. 2021;131:102–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00846-8>

8. Лысенко М.Н., Беденко В.М., Дальноки-Вересс Ф. Международно-правовое регулирование плавучих атомных электростанций: проблемы и перспективы. *Московский журнал международного права*. 2019;(3):59–67. <https://doi.org/10.24833/0869-0049-2019-3-59-67>

Lysenko M.N., Bedenko V.M., Dalnoki-Veress F. Legal regulations of floating nuclear power plants: problems and prospects. *Moscow journal of international law*. 2019;(3):59–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.24833/0869-0049-2019-3-59-67>

9. Гулевич А.В., Декусар В.М., Чебесков А.Н., Кучинов В.П., Волошин Н.П. Возможность экспорта быстрых реакторов в условиях международного режима ядерного нераспространения. *Атомная энергия*. 2019;127(3):171–175. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2613/2914> (дата обращения: 12.08.2025).

Gulevich, A.V., Dekusar, V.M., Chebeskov, A.N. et al. Possibility of fast-reactor exportation under an international nuclear non-proliferation regime. *Atomic energy*. 2020;127:192–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00609-3>

10. Dr Ross Peel (King's College London), George Foster (Amport Risk Ltd) and Professor Sukesh Aghara (University of Massachusetts Lowell). *Nuclear Security and Safeguards Considerations for Novel Advanced Reactors*. 2022;(12). 40 p. Available at: <nuclear-security-and-safeguards-considerations-for-novel-advanced-reactors.pdf> (accessed: 12.08.2025).

11. Волков Ю.Н., Гусев В.Е., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Бландинский В.Ю., Невиница В.А., Фомиченко П.А. Защищенность экспортных поставок топлива легководных реакторов из регенерированного урана с точки зрения гарантий МАГАТЭ. *Атомная энергия*. 2020;128(6):337–344. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3195/4168> (дата обращения: 14.07.2025).

Volkov, Y.N., Gusev, V.E., Smirnov, A.Y. *et al.* Security of export deliveries of regenerated-uranium light-water reactor fuel from the standpoint of IAEA safeguards. *Atomic energy*. 2020;128:368–374. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00701-8>

12. International Atomic Energy Agency. Safeguards Techniques and Equipment: International Nuclear Verification Series No. 1 (Rev. 2), IAEA, Vienna (2011). Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/nvs1_web.pdf (дата обращения: 10.07.2025).

13. Williams A.D., Cohn B., Osborn D. Security, Safety, and Safeguards (3S) Risk Analysis for Small Modular Reactors. *Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA. Proceedings of PATRAM Symposium 2019*. 1–10. Available at: <https://www.sandia.gov/research/publications/details/security-safety-and-safeguards-3s-risk-analysis-for-small-modular-reactors-2019-06-01> (accessed: 12.08.2025).

14. Virgili N. The Impact of Small Modular Reactors on Nuclear Non-Proliferation and IAEA Safeguards. Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation. Available at: <https://vcdnp.org/the-impact-of-smrs-on-non-proliferation-and-iaea-safeguards/> (accessed: 12.08.2025).

15. Велихов Е.П., Кузнецов В.П., Кучинов В.П., Скорохватов М.Д. Нейтринный контроль реакторов для применения гарантий МАГАТЭ к плавучим атомным энергоблокам. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2022;(1):71–73. Режим доступа: <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2022-01.pdf> (дата обращения: 12.08.2025).

Velikhov E.P., Kuznetsov V.P. Neutrino control of reactors for the application of the IAEA Safeguards to floating nuclear power units. *Problems of nuclear science and engineering. Series: Physics of nuclear reactors*. 2022;(1):71–73. (In Russ.). Available at: <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2022-01.pdf> (accessed: 12.08.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Присянов А.В. – формирование текста статьи в части применения оборудования мер сохранения и наблюдения;

Лац М.П. – формирование текста статьи в части применения оборудования мер сохранения и наблюдения;

Брыкалов С.М. – редактирование текста статьи перед отправкой в редакцию;

Сальникова Н.А. – редактирование текста статьи перед отправкой в редакцию;

Лазарев А.Е. – редактирование текста статьи перед отправкой в редакцию;

Мальев В.В. – формирование основного текста статьи и рисунков 11 и 12;

Тагирова Т.А. – формирование текста статьи в части введения и заключения;

Чижов А.С. – формирование и форматирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Алексей Владимирович Присянов, советник отдела международных организаций и экспортного контроля Блока международной деятельности Госкорпорации «Росатом», г. Москва, Российская Федерация. e-mail: AIVProsyanov@rosatom.ru

Максим Петрович Лац, ведущий специалист отдела международных организаций и экспортного контроля Блока международной деятельности Госкорпорации «Росатом», г. Москва, Российская Федерация. e-mail: MPLats@rosatom.ru

Сергей Михайлович Брыкалов, заместитель генерального директора по судовым проектам и проек-

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Prosyanov A.V. – text formation in terms of the use of containment and surveillance measures equipment;

Lats M.P. – text formation in terms of the use of containment and surveillance measures equipment;

Brykalov S.M. – editing the text of the article;

Salnikova N.A. – editing the text of the article;

Lazarev A.E. – editing the text of the article;

Malev V.V. – formation of the main text and figures 11 and 12;

Tagirova T.A. – text formation in terms of introduction and conclusion;

Chizhov A.S. – formation and formatting of article's text.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Alexey V. Prosyanov, Counsellor, Division of International Organizations and Export Control, International cooperation Unit, Rosatom, Moscow, Russian Federation. e-mail: AIVProsyanov@rosatom.ru

Maksim P. Lats, Leading specialist, Division of International Organizations and Export Control, International cooperation Unit, Rosatom, Moscow, Russian Federation. e-mail: MPLats@rosatom.ru

Sergey M. Brykalov, Deputy General Director for Marine Projects and SMR Power Generation Projects Afrikantov

там малой энергетики АО «ОКБМ Африкантов», доктор экономических наук, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5989-8802>

e-mail: sm-brykalov@okbm.nnov.ru

Надежда Александровна Сальникова, начальник управления нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8827-867X>

e-mail: salnikovana@okbm.nnov.ru

Александр Евгеньевич Лазарев, и.о. начальника отдела нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: lazarevae@okbm.nnov.ru

Владимир Владимирович Мальев, специалист 1 категории отдела нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5023-6455>

e-mail: malev.vladimir@okbm.nnov.ru

Татьяна Алексеевна Тагирова, специалист 2 категории отдела нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-9418-9298>

e-mail: tagirova.t@okbm.nnov.ru

Андрей Сергеевич Чижов, специалист 3 категории отдела нормативно-правовой поддержки проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0005-1824-1114>

e-mail: chijov_as@okbm.nnov.ru

OKBM JSC, Dr. Sci. (Econ.), Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5989-8802>

e-mail: sm-brykalov@okbm.nnov.ru

Nadezhda A. Salnikova, Head of SMR Legal and Regulatory Department, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8827-867X>

e-mail: salnikovana@okbm.nnov.ru

Alexander E. Lazarev, Acting Head of SMR Legal and Regulatory Division, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

e-mail: lazarevae@okbm.nnov.ru

Vladimir V. Malev, Specialist (Category 1) of the SMR Legal and Regulatory Division, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-5023-6455>

e-mail: malev.vladimir@okbm.nnov.ru

Tatyana A. Tagirova, Specialist (Category 2) of the SMR Legal and Regulatory Division, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-9418-9298>

e-mail: tagirova.t@okbm.nnov.ru

Andrey S. Chizhov, Specialist (Category 3) of the SMR Legal and Regulatory Division, Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0005-1824-1114>

e-mail: chijov_as@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию / Received 15.08.2025

После доработки / Revision 23.10.2025

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-02>

УДК [004.422.8+007.5]:681.54

EDN RWUQOK


Оригинальная статья / Original paper



**Роботизированная система для выполнения химических синтезов
с анализом продуктов**

Н.Ю. Серов^{1,2}  , М.Ш. Адыгамов^{1,2} , А.О. Голубь¹ , Т.Р. Гимадиев^{1,2} 

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Химический институт им. А.М. Бутлерова, г. Казань, Российская Федерация

² Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Российская Федерация
 Nikita.Serov@kpfu.ru

Аннотация. В данной работе описана роботизированная установка для выполнения химических синтезов с анализом продуктов, выполненная с целью создания прототипа робота-химика. Основой послужила автоматизированная система «LifeBot» от российско-японской компании Эвотэк-Мирай Геномикс. Система «LifeBot» была изначально разработана для выделения нуклеиновых кислот и приготовления смесей. Для перепрофилирования системы под химические задачи были сделаны различные модификации, в том числе увеличение числа хранящихся растворителей и растворов, дозируемых через дополнительно установленные перистальтические насосы, расширение числа доступных реагентов через модификацию хранилища и добавление манипулятора и стойки с хранилищами. Наиболее существенной модификацией стало оснащение установки самодельным смесителем с нагревом и контролем температуры, который и позволяет осуществлять параллельные химические синтезы. Еще одной важной модификацией стало добавление интерфейса взаимодействия с жидкостным хроматографом, благодаря чему возможно выполнение анализа реакционных смесей после синтеза. Программное обеспечение написано на языке Python и позволяет осуществлять как прямой контроль над физическими аспектами роботизированной системы, так и проводить параллельные синтезы в автоматическом режиме, начиная с расчета требуемых объемов реагентов, их отбора и приготовления реакционных смесей, продолжая перемешиванием в течение установленного для синтеза времени с нагревом до требуемой температуры и заканчивая отбором и разбавлением проб для анализа и их отправкой на хроматограф. Таким образом, присутствие человека требуется только во время подготовки к синтезу (загрузка растворов в хранилища, установка чистых наконечников дозатора и реакторов) и после завершения синтеза (удаление использованных реакторов и наконечников), что является перспективным в плане минимизации контакта человека при работе с вредными и/или опасными веществами. Автоматизированное выполнение синтезов на роботизированной установке с последующим анализом продуктов было проверено на реакциях образования олигопептидов глицина под действием триметафосфата натрия, в которых варьировались условия синтеза: соотношения реагентов, температура, время процесса.

Ключевые слова: робототехника, химический синтез, анализ продуктов, автоматизация химических процессов, ВЭЖХ-анализ, искусственный интеллект, хемоинформатика, органические реакции.


Для цитирования: Серов Н.Ю., Адыгамов М.Ш., Голубь А.О., Гимадиев Т.Р. Роботизированная система для выполнения химических синтезов с анализом продуктов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):19–29. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-02>

For citation: Serov N.Yu., Adygamov M.Sh., Golub A.O., Gimadiev T.R. Robotic system for performing chemical synthesis with analysis of products. *Global Safety*. 2025;15(4):19–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-02>

Robotic system for performing chemical synthesis with analysis of products

Nikita Yu. Serov^{1,2}  , Musa Sh. Adygamov^{1,2} , Anton O. Golub¹ , Timur R. Gimadiev^{1,2} 

¹ Kazan Federal University, A.M. Butlerov Chemistry Institute, Kazan, Russian Federation

² Federal Research Center «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science», Kazan, Russian Federation
 Nikita.Serov@kpfu.ru

Abstract. This paper describes a robotic system for performing chemical syntheses with product analysis, made with the aim of creating a prototype of a robot chemist. The basis was the automated system from the Russian-Japanese company Evotech-Mirai Genomics called «LifeBot». «LifeBot» was originally developed for isolating nucleic acids and preparing mixtures. To reprofile the system for chemical tasks, various modifications were made, including increasing the number of stored solvents and solutions dosed through additionally mounted peristaltic pumps, expanding the number of available reagents by modifying the storage and adding a manipulator and a rack with storage. The most significant modification was equipping the setup with a mixer with heating and temperature control, which allows parallel chemical syntheses execution. Another important modification was the addition of an interface for interacting with a liquid chromatograph, that makes it possible to analyze reaction mixtures after the synthesis. The software is written in Python and allows both direct control over the physical aspects of the robotic system and automatic parallel syntheses execution, starting with calculation of the required volumes of reagents, preparation of reaction mixtures, followed by stirring for the time required for synthesis with heating to the selected temperature and finishing with sampling and dilution for analysis and their sending to the chromatograph. Thus, human presence is required only during pre-synthesis preparations (loading solutions into storage, installing clean dispenser tips and reactor tubes) and after synthesis completion (release from used reactors and tips), which is promising in terms of minimizing human contact while working with harmful and/or hazardous substances. The operation of the system in automated syntheses with product analysis was tested on the reaction of glycine oligopeptide formation under the action of sodium trimetaphosphate, in which the synthesis conditions were varied: reagent ratios, temperature, process time.

Keywords: robotics, chemical synthesis, product analysis, automation of chemical processes, HPLC analysis, artificial intelligence, chemoinformatics, organic reactions.

Введение

Использование роботизированных установок для проведения научных экспериментов в настоящее время привлекает все больше внимания, что связано с рядом факторов. Во-первых, роботизация позволяет осуществлять большой массив экспериментов в автоматическом режиме, что не только экономит время исследователя, но и минимизирует человеческий фактор, который становится существенным при проведении большого числа однотипных действий. Во-вторых, роботизация позволяет минимизировать личное присутствие человека во время проведения процесса, что является важным фактором при работе с вредными и/или опасными веществами. В-третьих, робот может осуществлять процессы и следить за их протеканием в режиме 24/7, что не только увеличивает число выполняемых экспериментов, но и, что более существенно, улучшает их контроль и повышает воспроизводимость.

Системы автоматического проведения химических синтезов можно разделить на 2 основных типа: традиционные (batch) и проточные (flow). Традиционные системы, такие как установка «Jubilee» [1], собранная на базе компонентов 3D-принтера, или установка [2], собранная из простой лабораторной посуды, проводят реакции в закрытых

сосудах, что упрощает их реализацию, но ограничивает контроль условий. В более продвинутых вариантах используется роботизированная рука [3–7] и манипулятор [2,8,9], имитирующие действия исследователя, или мобильные платформы [10,11], способные перемещаться по лаборатории и работать с существующим оборудованием. Проточные системы, напротив, обеспечивают непрерывный процесс с высокой производительностью и стабильными условиями, но требуют дорогостоящего оборудования и специфических реакторов для разных типов синтезов, как в установках групп Л. Кронина [12–14] и К.Ф. Дженсена [15–18], где роботы автоматически конфигурируют модули для проточных синтезов [16].

Автоматизированная установка с 2-мя роботизированными руками была разработана отечественными исследователями из университета ИТМО [5,19] и показала свою работоспособность на экспериментах по исследованию проницаемости мембран в зависимости от значений pH и способности синтезированных роботом мембран на основе графенового оксида и полиэтиленimina демонстрировать селективную аффинность к определенным катионам (в частности, к калию).

Специализированные роботизированные системы разрабатываются для более узких

задач: электрохимического синтеза [20], кристаллизации [9] или получения наночастиц [21]. Несмотря на ограниченную автономность, такие системы демонстрируют высокую эффективность в параллельных экспериментах и открывают новые возможности для фундаментальной науки и фармацевтики.

Несмотря на перечисленные выше преимущества, использование роботизированных установок в лабораториях пока имеет ограниченный характер. Немаловажным препятствием для этого является тот факт, что зачастую в лаборатории (в отличие от промышленности) нужно совершать разные последовательности операций и принимать решения при нестандартных ситуациях, на что оказываются не способны простые роботизированные системы. Решением этой проблемы является сочетание роботизированных установок со сложными алгоритмами и искусственным интеллектом, что позволяет существенно расширить круг исследовательских задач.

В настоящей работе описана роботизированная система для проведения химических синтезов, сделанная на базе «LifeBot» – автоматизированной системы выделения нуклеиновых кислот вируса SARS-CoV-2 и приготовления смесей от российско-японской компании Эвотэк-Мирай Геномикс. Представленная работа является частью проекта по созданию интеллектуального роботехимика, который должен уметь предсказывать соединения с заданными свойствами, пути их синтеза, осуществлять сам синтез и анализ его продуктов, а также, при необходимости, уточнять существующие модели и базы данных.

Устройство роботизированной системы

В качестве основы для создания роботизированной установки для химических синтезов была использована автоматизированная система выделения НК вируса SARS-CoV-2 и приготовления смесей от российско-японской компании Эвотэк-Мирай Геномикс. Данная система в изначальном варианте может осуществлять открытие/закрытие криопробирок, смену наконечников дозаторов, отбор и перенос жидких образцов,

фильтрование. Кинематика системы схожа с используемой в станках с ЧПУ: вдоль рабочего поля движется портал, по которому, в свою очередь, движется «голова», на которой расположены различные устройства (дозаторы, выводы перистальтических насосов, устройство для открытия/закрытия криопробирок, камера), часть из которых может перемещаться в вертикальном направлении.

Однако для использования этой системы с целью проведения химических синтезов в нее был внесен ряд изменений. Общий вид полученной системы приведен на рисунке 1 (в левой части которого видна ВЭЖХ-система Knauer Smartline, использованная для анализа реакционных смесей). Одной из важных модификаций стало добавление перистальтических насосов (видны на рис. 1 вместе с бутылками на правой стороне роботизированной системы), что позволило освободить основное хранилище от хранения больших количеств наиболее ходовых растворителей, а также растворов кислот и оснований, и, кроме того, минимизировать время приготовления реакционных смесей и число используемых наконечников.

Перистальтические насосы были собраны на базе шаговых двигателей Nema 17 и готовых головок; кронштейны были смоделированы и напечатаны на 3D-принтере по технологии послойного наплавления. Для управления шаговыми двигателями использованы драйвера DRV8825, которые подключены к одноплатному компьютеру (который и управляет всей роботизированной системой). Рядом с каждым насосом размещается бутылка с соответствующим растворителем или раствором. В качестве сосудов были выбраны бутылки стандарта GL45 объемами 250 и 500 мл, для которых были напечатаны крышки с отверстиями под используемые шланги, а также держатели, причем последние сделаны таким образом, что можно разместить бутылку объемом 500 мл, либо 250, но для последней используется дополнительная вставка (могут быть использованы и бутылки GL45 объемом 100 мл, но это требует другой вставки). Использование сосудов разных объемов с перистальтическими насосами предусмотрено не случайно – для растворителей и растворов, стабильных

в течение длительного времени, используются бутылки большого объема; если же растворитель не очень стабилен при длительном хранении (это касается многих органических растворителей, которые могут обводняться, загрязняться перекисями или другими примесями), то используются сосуды меньшего объема для более частого обновления на свежечищенный компонент.



Рисунок 1. Общий вид роботизированной системы [составлено авторами]

Figure 1. General view of the robotic system [compiled by the authors]

Следует отметить, что гораздо лучше использовать для дозирования шприцевые насосы (что требует наличия химстойких переключающих кранов, из-за чего такое решение становится более дорогим). Однако для разрабатываемого прототипа с учетом требуемых для синтезов точности и воспроизводимости дозирования жидкостей достаточно примененных перистальтических насосов.

Ряд изменений коснулся и рабочего поля, которое показано на рисунке 2. Во-первых, исходный держатель наконечников на 96 позиций был заменен на увеличенный до 190 позиций печатный (обозначен цифрой 2 на рис. 2). Во-вторых, держатель криопробирок хранилища был сменен на более легкий печатный (обозначен цифрой 3) с кронштейнами для возможности смены с помощью манипулятора, что будет рассмотрено ниже (исходный держатель слишком массивный и у него нет зацепов для смены с помощью манипулятора). В-третьих, был добавлен отборник проб (обозначен цифрой 6), в который переносится и где разбавляется образец после синтеза перед отправкой на хроматограф. Отборник проб через один из встроенных перистальтических насосов по капилляру подключен к крану с петлей ВЭЖХ-системы.

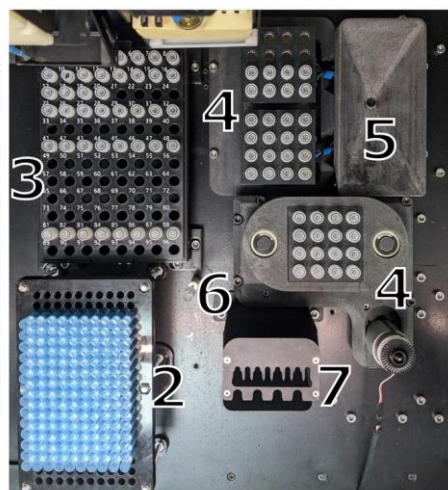
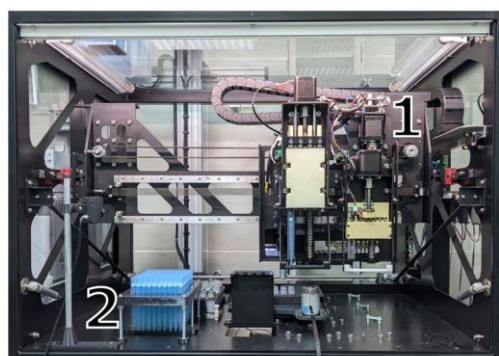


Рисунок 2. Рабочее поле роботизированной системы (слева – вид спереди, справа – вид сверху): 1 – «голова», 2 – держатель наконечников дозатора, 3 – хранилище реагентов, 4 – смесители с нагревом, 5 – слив, 6 – отборник проб для хроматографа, 7 – сбрасыватель наконечников [составлено авторами]

Figure 2. The working field of the robotic system (left – front view, right – top view): 1 – «head», 2 – dispenser tip holder, 3 – reagent storage, 4 – mixers with heating, 5 – drain, 6 – sampler for the chromatograph, 7 – tip ejector [compiled by the authors]

Главной и наиболее существенной модификацией системы, благодаря чему вообще стало возможным ее использование для химических синтезов, стало изготовление смесителя с подогревом. В качестве метода перемешивания было выбрано вихревое перемешивание (вортекс), которое в отличие от магнитных или верхнеприводных мешалок не требует погружения в реактор перемешивающего якоря и поэтому хорошо подходит для параллельных синтезов в реакционных сосудах малого объема.

В качестве реакционных сосудов используются полипропиленовые криопробирки на 1.5 или 2 мл (такие же, как используются в хранилище), что позволило осуществлять открытие/закрытие реакторов уже имеющимся в системе устройством для крышек. Кроме того, использование реакторов малого объема привлекательно с точки зрения химии в том плане, что позволяет провести большое число синтезов с подбором условий и/или реагентов при небольшом расходовании реактивов. Однако использование реакторов из полипропилена ограничивает максимально возможную при синтезе температуру.

В качестве нагревателей используются коммерчески доступные нагревательные пластины, а контроль и измерение температуры осуществляется с помощью цифровых датчиков DS18B20, диапазона и точности измерения которых достаточно для проведения химических синтезов. Несомненным достоинством таких датчиков является возможность прямого подключения к одноплатному компьютеру, причем на одной шине данных может находиться множество устройств. Для более равномерного переноса тепла от нагревательных пластин к реакторам каждый реактор помещен в отрезок алюминиевой трубки, нижний конец которой контактирует с пластиной, а внутренний диаметр подобран таким образом, чтобы обеспечивать достаточно плотную «посадку» реакторов, но с возможностью легкой замены. Сами трубки запрессованы в держатели, которые, как и детали для фиксации нагревателей, были смоделированы и напечатаны из стеклонеполненного полипропилена PP-GF30. Данный материал выбран

благодаря хорошей термической стойкости, достаточной прочности, небольшой усадке, а также химстойкости. Следует отметить, что над одной нагревательной пластиной расположено несколько реакторов и термодатчик, из-за чего нагрев осуществляется по зонам (т.е. одна температура будет установлена для всей зоны, а не для каждого отдельного реактора).

Нагреватели с держателями закреплены на платформе, которая через эксцентрики с подшипниками связана с основанием. Каждая платформа находится на двух эксцентриках, синхронизированных между собой через один ремень GT-2 и шкивы, движение ремня же обеспечивается двигателем. В качестве двигателя одного из смесителей (нижняя цифра 4 на рис. 2) используется обычный двигатель постоянного тока. Такое устройство легко управляется через подачу/отключение электропитания, однако каждая остановка двигателя происходит в произвольном положении, из-за чего необходима корректировка координат реакторов после каждого использования перемешивания перед открытием крышки и отбором образца. Для корректировки была специально обучена нейросетевая модель, которая на основе фотографии, делаемой с помощью имеющейся на «голове» камеры, производит определение текущих координат реакторов данного смесителя.

Второй смеситель (верхняя цифра 4 на рис. 2) приводится в движение шаговым двигателем. Такая конструкция несколько сложнее, чем предыдущая, поскольку требует наличия драйвера шагового двигателя, но зато имеет возможность регулировки скорости вращения, направления вращения и числа оборотов, а также дает возможность возвращаться к одним и тем же координатам реакторов благодаря использованию оптического концевика, по которому задается нулевое положение.

Обороты обоих смесителей были подобраны таким образом, чтобы обеспечивать эффективное перемешивание реагентов не более чем за 20–30 секунд (что было проверено на перемешивании достаточно вязкого раствора щелочи с индикатором). Так как для обычных синтезов нет необходимости

в таком эффективном перемешивании на протяжении всего времени синтеза, то был сделан цикл, состоящий из чередующихся интервалов с перемешиванием и без перемешивания на протяжении выполнения синтезов.

Для проведения разнообразных синтезов одного хранилища на 96 позиций недостаточно, поэтому для снятия этого ограничения была сделана еще одна существенная модификация системы – с задней стороны был добавлен манипулятор с полками для хранилищ (рис. 3).

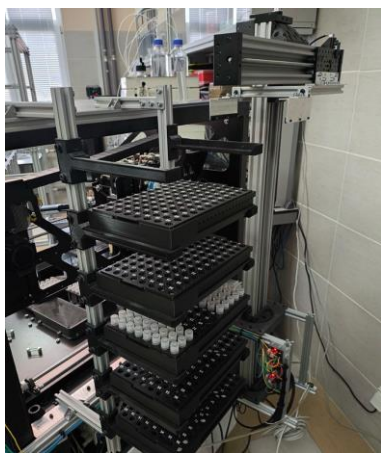


Рисунок 3. Манипулятор с хранилищами [составлено авторами]

Figure 3. Manipulator with storages [compiled by the authors]

Манипулятор состоит из вертикальной направляющей, по которой двигается балка с горизонтальной осью. Вдоль последней движется кронштейн с зацепами для перемещения хранилищ. Перемещения вдоль этих осей реализованы через передачу вращения шаговых моторов на ходовые винты. Движение по третьей координате реализовано путем вращения вертикальной направляющей мотором через ремень GT-2. Конструкция собрана на основе конструкционного алюминиевого профиля с использованием разных уголков и печатных деталей. Для перемещения осей с умеренной скоростью достаточно шаговых двигателей Nema 17. Нулевые положения по каждой из осей устанавливаются с помощью оптических концевиков при инициализации.

Положение манипулятора выставлено таким образом, чтобы он мог брать хранилище с рабочего поля робота и переставлять на

полку и обратно. В прототипе сделано 6 полок, что позволяет работать с 6 хранилищами по 96 позиций, однако число хранилищ при необходимости может быть увеличено как через увеличение высоты по вертикали, так и через добавление полок, расположенных под другим углом к манипулятору. Позиции в каждом хранилище пронумерованы, что является удобным при заполнении хранилища человеком. Контрастную нумерацию (сделанную двумя цветами) можно использовать для детектирования наличия/отсутствия реакторов в хранилище, если для этого дополнительно настроить модель компьютерного зрения.

В целом, сделанные модификации достаточно чтобы проводить химические синтезы с использованием широкого круга реагентов и растворителей. Кроме того, была добавлена широкоформатная камера, которая может использоваться как для удаленного наблюдения за рабочим полем роботизированной системы, так и для записи видео с целью отслеживания возможных ошибок и качества работы установки после проведения эксперимента.

Программная часть

Программное обеспечение (ПО) для роботизированной системы написано на языке Python и обеспечивает два уровня взаимодействия – низкоуровневый и высокоуровневый. Эти уровни взаимодействуют между собой, создавая систему, которая позволяет роботизированной установке эффективно выполнять химические эксперименты, обеспечивая при этом точность и гибкость управления.

Низкий уровень ПО отвечает за управление физическими компонентами робота и всей рабочей платформой и включает в себя точное управление движениями робота в рабочем поле, а также взаимодействие с различными устройствами, такими как смеситель, нагреватель, перистальтические насосы, пипетки-дозаторы, устройство для открытия крышек и манипулятор хранилища. Кроме того, низкий уровень собирает данные с датчиков температуры, концевиков, камер, а также обеспечивает взаимодействие (включая отправку сигналов и получение

обратной связи) с хроматографом. В целом, низкий уровень программного обеспечения осуществляет прямой контроль над физическими аспектами работы робота.

Высокий уровень ПО работает с более абстрактными концепциями, такими как молекулы и химические реакции. На этом уровне программное обеспечение предоставляет пользователям возможность задавать роботизированной системе химические задачи, такие как выполнение синтезов, приготовление растворов с нужной концентрацией, а также другие задачи, связанные с планированием химических экспериментов.

На высоком уровне ПО осуществляется работа с химическими абстракциями, т.е. роботизированная система знает, какие вещества и/или растворы доступны в хранилище и насосах, и может анализировать возможность выполнения поставленных задач исходя из доступных реагентов и их количеств. Это позволяет автоматизировать процесс синтеза, где установка сама следит за ходом реакции и приготовлением реакционных смесей.

К высокому уровню относится и подготовка растворов: ПО автоматически рассчитывает необходимые пропорции для создания растворов заданной концентрации, выбирает подходящую посуду и устройства для приготовления (в зависимости от того, где находится компонент – в хранилище или в сосуде насоса), осуществляет смешение компонентов. В случае, если при использовании пипеточного дозатора отбираемый объем реагента оказывается слишком мал для воспроизводимого дозирования, то осуществляется промежуточное разбавление в пустом сосуде.

Кроме того, на высоком уровне ПО осуществляется взаимодействие с химическими базами данных для извлечения необходимой информации о веществах и реакциях. Также обновляется база данных по мере расходования реагентов или создания новых смесей, что позволяет отслеживать актуальность информации.

Оба уровня программного обеспечения взаимодействуют между собой, обеспечивая эффективную и гладкую работу роботизированной системы. Высокоуровневые задачи,

такие как синтез химического соединения или создание раствора, переводятся в конкретные действия, которые выполняются на низком уровне. Затем производится контроль выполнения каждого шага. Информация с низкого уровня передается обратно на высокий уровень для анализа и корректировки процессов. Этот цикл взаимодействия позволяет адаптироваться к меняющимся условиям эксперимента и обеспечивать точность на всех этапах работы.

Программный код хранится на системе версионирования Gitlab, развернутой внутри лаборатории и состоит из нескольких модулей, каждый из которых выполняет свою роль в общей системе. Модуль Controls отвечает за управление устройствами роботизированной установки, включая перемещение, манипуляции с предметами и взаимодействие с оборудованием. Менеджмент хранилищ с реактивами, включая учет запасов и контроль их использования, относится к модулю Storages. За хранение цифровой информации о химических реакциях и молекулах, а также анализ химических процессов отвечает модуль Chemistry. Actions – это код для реализации высокоуровневых операций робота, таких как проведение синтеза, смешивание веществ и другие химические задачи. Модуль Computer Vision отвечает за использование камер и моделей компьютерного зрения для мониторинга процессов и контроля состояния реакций. За работу с хроматографом, а именно за запуск задач на анализ образца, а также разбавление и перемещение образца в хроматограф, отвечает модуль Analysis. Такое разделение на модули и интеграция с двумя уровнями взаимодействия позволяют эффективно справляться с разнообразными химическими задачами.

Процедура автоматического проведения синтеза начинается с инициализации всех программных модулей роботизированной установки, что включает установление начальных параметров и загрузку необходимых программных компонентов. Этот этап создает функциональную основу для последующих операций. Следующим шагом в алгоритме синтеза является проверка наличия всех необходимых реагентов в хранилище. Проверка осуществляется с учетом предва-

рительно рассчитанных количеств веществ, необходимых для проведения конкретных реакций.

После завершения этапа проверки наличия реагентов, роботизированная система переходит к отбору необходимых количеств веществ, которые затем переносятся в реакторы. Далее осуществляется нагрев до нужной температуры. Параллельно с этим проводится интенсивное перемешивание, которое способствует равномерному распределению энергии и повышению эффективности химического процесса. После завершения синтезов, производится последовательный отбор реакционных смесей, их разбавление и отправка в хроматограф для анализа.

На текущий момент программное обеспечение реализовано как единая программа, что означает, что после запуска роботизированная установка выполняет заранее заданный список операций. Для следующей партии синтезов необходимо передавать новый список реактивов и заданий. Такой подход был выбран на стадии разработки первичного прототипа, поскольку он упрощает процесс реализации операций и отработки последовательности действий.

Апробация работы роботизированной системы

После модификации, написания ПО и настройки роботизированной системы ее работа была проверена на осуществлении химических синтезов с анализом продуктов. В качестве реакции для изучения было

выбрано образование олигопептидов из глицина под действием триметафосфата натрия [22], поскольку сама реакция осуществляется из доступных реагентов и анализ реакционных смесей происходит достаточно быстро, позволяя проводить достаточно большое число экспериментов за короткое время, что является важным фактором для апробации и корректировки работы роботизированной системы, а также выявления стабильности ее работы на большой экспериментальной выборке.

Выбранная реакция служит неплохой модельной системой для отработки варьирования условий синтеза, таких как концентрации (и соотношение) глицина и триметафосфата натрия, количество добавляемой щелочи, температура и время осуществления процесса. Примеры полученных с помощью роботизированной системы результатов пептидного синтеза представлены на рисунке 4.

Из рисунка 4 видно, что зависимости выходов олигопептидов от количества добавленной щелочи проходят через максимум, что согласуется с механизмом процесса [22], когда в отсутствие щелочи аминогруппа глицина протонирована и не способна участвовать в реакции, а в слишком щелочной среде усиливается гидролиз триметафосфата, интермедиатов и продуктов реакции.

В целом, роботизированная установка позволила осуществить 400 пептидных синтезов за общее время менее двух недель (включая время анализа), что является недостижимым результатом при выполнении синтезов в обычном «ручном» режиме.

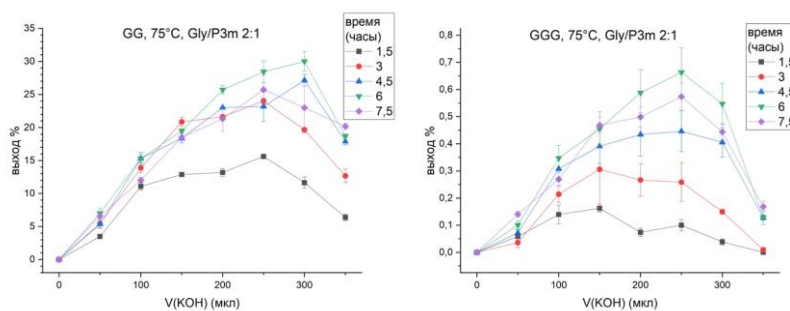


Рисунок 4. Выходы глицилглицина (GG, слева) и диглицилглицина (GGG, справа), полученные с помощью роботизированной установки при 75°C и соотношении глицин/триметафосфат 2:1 для различных количеств щелочи и времени синтеза [составлено авторами]

Figure 4. Yields of glycylglycine (GG, left) and diglycylglycine (GGG, right) obtained using a robotic system at 75°C and a glycine/trimetaphosphate ratio of 2:1 for different amounts of alkali and synthesis times [compiled by the authors]

Заключение

Созданный прототип роботизированной системы позволяет осуществлять химические синтезы с анализом продуктов реакции и является перспективным для работы с вредными и/или опасными веществами, поскольку не требует присутствия человека при проведении экспериментов. Для анализа продуктов использовался жидкостный хроматограф, однако могут быть использованы и другие методы анализа при условии, что робот сможет загрузить образец и отдать команду оборудованию на выполнение анализа.

Важным преимуществом использования роботизированной установки для проведения синтезов по сравнению с человеком является и то, что можно осуществить большой массив экспериментов с минимизацией ошибок, что важно при подборе путей синтеза веществ, оптимизации условий проведения процессов, подборе каталитических систем и т.п. В таких случаях от исследователя требуется выполнение множества похожих действий, что не только является нерациональной тратой времени, но и является источником ошибок, зачастую незамеченных исследователем и способных приводить к невоспроизводимости результатов.

Задание на выполнение эксперимента и его результаты находятся в цифровом представлении, что является существенным фактором для дальнейшей интеграции роботизированной установки в систему с искусственным интеллектом (ИИ), когда ИИ не только предсказывает на основании моделей соединения с заданными свойствами и пути синтеза, но и дает задание роботизированной

системе на выполнение эксперимента, а также получает результаты, подтверждающие или опровергающие (а в перспективе и уточняющие) использованную модель.

Применительно к атомной отрасли использование представленного прототипа робота-химика выглядит перспективным в различных синтетических задачах с опасными веществами (токсичными, радиоактивными, взрывчатыми и т.п.), когда требуется найти соединение с нужными свойствами, подобрать условия его синтеза и проверить как выход целевого вещества, так и его свойства на какой-либо тест-системе (при этом все упомянутые стадии не требуют присутствия человека при осуществлении на роботизированной установке). В эту группу задач можно отнести синтез высокоэнергетических веществ, создание соединений с меченными атомами, разработку радиофармпрепаратов. Другим возможным применением является оптимизация экстракционных процессов для извлечения радиоактивных элементов, а именно автоматизированный синтез новых экстрагентов и проверка их экстракционной способности на модельных образцах. При этом возможен и вариант мембранной экстракции (с созданием специальной ячейки), когда загрузка отдающей и принимающей фаз, анализ фаз в процессе эксперимента, а также промывка между образцами будут осуществляться роботизированной установкой. Не следует отбрасывать и возможность применения подобных автоматизированных систем в расширении знаний о химии радиоактивных элементов, а также в изучении процессов разложения веществ под действием радиации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Vasquez J., Twigg-Smith H., Tran O'Leary J., Peek N. Jubilee: An Extensible Machine for Multi-tool Fabrication. Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems CHI '20: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. Honolulu HI USA: ACM, 2020. P. 1–13. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3313831.3376425>
2. Saugbjerg J.R., Jensen T.B., Hinge M., Henriksen M.L. A modular low-cost automated synthesis machine demonstrated by ring-opening metathesis polymerization. *Reaction Chemistry & Engineering*. 2023;8(11):2866–2875. <https://doi.org/10.1039/D3RE00345K>
3. Godfrey A.G., Masquelin T., Hemmerle H. A remote-controlled adaptive medchem lab: an innovative approach to enable drug discovery in the 21st Century. *Drug discovery today*. 2013;18:795–802. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2013.03.001>

4. Li J., Lu Y., Xu Y., Liu C. et al. AIR-Chem: Authentic Intelligent Robotics for Chemistry. *Journal of physical chemistry A*. 2018;122(46):9142–9148. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.8b10680>
5. Meshkov A.V., Yurova V.Yu., Aliev T.A., Potapov V.V. et al. Collaborative robots using computer vision applications in a chemical laboratory. *Mendeleev communications*. 2024;34(6):769–773. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2024.10.001>
6. Lim J.X.Y., Leow D., Pham Q.C., Tan C.H. Development of a Robotic System for Automatic Organic Chemistry Synthesis. *IEEE Transactions on automation science and engineering*. 2021;18(4):2185–2190. <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.3036055>
7. Zhu Q., Huang Y., Zhou D., Zhao L. et al. Automated synthesis of oxygen-producing catalysts from Martian meteorites by a robotic AI chemist. *Nature synthesis*. 2023;3(3):319–328. <https://doi.org/10.1038/s44160-023-00424-1>
8. Martin K.N., Rubsamen M.S., Kaplan N.P., Hendricks M.P. Method for interfacing a plate reader spectrometer directly with an OT-2 liquid handling robot. ChemRxiv. Preprint. 2022. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2022-6z4q1>
9. Lee E.C., Salley D., Sharma A., Cronin L. AI-Driven Robotic Crystal Explorer for Rapid Polymorph Identification. Cornell University *arXiv:2409.05196*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.05196>
10. Burger B., Maffettone P.M., Gusev V.V., Aitchison C.M. et al. A mobile robotic chemist. *Nature*. 2020;583(7815):237–241. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2442-2>
11. Dai T., Vijayakrishnan S., Szczypliński F.T., Ayme J.-F. et al. Autonomous mobile robots for exploratory synthetic chemistry. *Nature*. 2024;635(8040):890–897. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08173-7>
12. Dragone V., Sans V., Rosnes M.H., Kitson P.J., Cronin L. 3D-printed devices for continuous-flow organic chemistry. *Beilstein journal of organic chemistry*. 2013;9:951–959. <https://doi.org/10.3762/bjoc.9.109>
13. Chisholm G., Kitson P.J., Kirkaldy N.D., Bloor L.G., Cronin L. 3D printed flow plates for the electrolysis of water: an economic and adaptable approach to device manufacture. *Energy & environmental science*. 2014;7(9):3026–3032. <https://doi.org/10.1039/C4EE01426J>
14. Steiner S., Wolf J., Glatzel S., Andreou A. et al. Organic synthesis in a modular robotic system driven by a chemical programming language. *Science*. 2019;363(6423):eaav2211. <https://doi.org/10.1126/science.aav2211>
15. Bédard A.-C., Adamo A., Aroh K.C., Russel M.G. et al. Reconfigurable system for automated optimization of diverse chemical reactions. *Science*. 2018;361(6408):1220–1225. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aat0650>
16. Coley C.W., Thomas D.A., Lummiss J.A.M., Jaworski J.N. et al. A robotic platform for flow synthesis of organic compounds informed by AI planning. *Science*. 2019;365(6453) <https://doi.org/10.1126/science.aax1566>
17. Koscher B.A., Cauty R.B., McDonald M.A., Greenman K.P. et al. Autonomous, multiproperty-driven molecular discovery: From predictions to measurements and back. *Science*. 2023;382(6677). <https://doi.org/10.1126/science.ad11407>
18. Adamo A., Beingessner R.L., Behnam M., Chen J. et al. On-demand continuous-flow production of pharmaceuticals in a compact, reconfigurable system. *Science*. 2016;352(6281):61–67. <https://doi.org/10.1126/science.aaf1337>
19. Meshkov A.V., Nikitina A.A., Aliev T.A., Gromov V.S. Robotization of Synthesis and Analysis Process of Graphene Oxide-Based Membrane. *Advanced intelligent systems*. 2024;6(5):2300655. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300655>
20. Rial-Rodríguez E., Williams J.D., Cantillo D., Fuchb T. et al. An Automated Electrochemical Flow Platform to Accelerate Library Synthesis and Reaction Optimization. *Angewandte chemie*. 2024;136(51):e202412045. <https://doi.org/10.1002/ange.202412045>
21. Jensen T.B., Saugbjerg J.R., Henriksen M.L., Quinson J. Towards the automation of nanoparticle syntheses: The case study of gold nanoparticles obtained at room temperature. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*. 2024;702(2):135125. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135125>
22. Serov N.Yu., Shtyrlin V.G., Khayarov Kh.R. The kinetics and mechanisms of reactions in the flow systems glycine–sodium trimetaphosphate–imidazoles: the crucial role of imidazoles in prebiotic peptide syntheses. *Amino Acids*. 2020;52:811–821. <https://doi.org/10.1007/s00726-020-02854-z>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Серов Н.Ю. – модификация системы для ПЦР тестов под проведение химических синтезов, создание физического интерфейса взаимодействия роботизированной установки с ВЭЖХ-системой, настройка ВЭЖХ-системы для выполнения анализов;

Адыгамов М.Ш. – написание и проверка алгоритмов работы роботизированной системы, создание программного интерфейса взаимодействия роботизированной установки с ВЭЖХ-системой;

Голубь А.О. – проверка и корректировка отдельных алгоритмов, подготовка роботизированной системы к выполнению синтезов, обработка результатов;

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Serov N.Yu. – modification of the PCR test system for chemical syntheses, creation of a physical interface for interaction of the robotic setup with the HPLC system, adjustment of the HPLC system for performing analyses;

Adygamov M.S. – writing and testing of the robotic system operation algorithms, a software interface creation for interaction of the robotic setup with the HPLC system;

Golub A.O. – testing and correction of individual algorithms, preparation of the robotic system for performing syntheses, processing of results;

Гимадиев Т.Р. – постановка задачи и руководство работой, разработка общей концепции роботизированной системы и ее работы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТЬ:

Авторы выражают благодарность российско-японской компании Эвотэк-Мирай Геномикс за предоставленную на безвозмездной основе систему LifeBot.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Никита Юрьевич Серов, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории автоматизированных биохимтехнологий отдела перспективных исследований Федерального исследовательского центра «Казанского научного центра Российской академии наук»; доцент кафедры неорганической химии Химического института им. А.М. Бутлерова Казанского (Приволжского) федерального университета, Российская Федерация.
<http://orcid.org/0000-0002-5772-8399>

e-mail: Nikita.Serov@kpfu.ru

Муса Шамильевич Адыгамов, младший научный сотрудник лаборатории автоматизированных биохимтехнологий отдела перспективных исследований Федерального исследовательского центра «Казанского научного центра Российской академии наук»; аспирант Казанского (Приволжского) федерального университета, Российская Федерация.
<http://orcid.org/0009-0006-2364-9867>

e-mail: musa20930@gmail.com

Антон Олегович Голубь, магистрант направления «Хемоинформатика и молекулярное моделирование» Химического института им. А.М. Бутлерова Казанского (Приволжского) федерального университета, Российская Федерация.
<http://orcid.org/0009-0004-0090-0292>

e-mail: toxa.mix7@gmail.com

Тимур Рустемович Гимадиев, PhD., старший научный сотрудник лаборатории автоматизированных биохимтехнологий отдела перспективных исследований Федерального исследовательского центра «Казанского научного центра Российской академии наук»; доцент кафедры органической химии Химического института им. А.М. Бутлерова Казанского (Приволжского) федерального университета, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0001-5012-0308>

e-mail: Timur.Gimadiev@gmail.com

Gimadiev T.R. – setting the task and managing the work, development of the general concept of the robotic system and its operation.

FUNDING:

This work was funded by financial support from the government assignment for FRC Kazan Scientific Center of RAS.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ACKNOWLEDGMENTS:

The authors express their gratitude to the Russian-Japanese company Evotech-Mirai Genomics for providing the LifeBot system free of charge.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Nikita Yu. Serov, Cand. Sci(Chem), Leading Researcher of the Laboratory of automated biochemical technologies of the Department of Advanced Research of the Federal Research Center «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science»; Associate Professor, Department of Inorganic Chemistry of the A.M. Butlerov Chemistry Institute of the Kazan Federal University, Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0002-5772-8399>

e-mail: Nikita.Serov@kpfu.ru

Musa Sh. Adygamov, Junior Researcher, Laboratory of automated biochemical technologies, Department of Advanced Research, Federal Research Center «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science»; Postgraduate student, Kazan Federal University, Russian Federation.
<http://orcid.org/0009-0006-2364-9867>

e-mail: musa20930@gmail.com

Anton O. Golub, Master's student, Chemoinformatics and Molecular Modeling program, A.M. Butlerov Chemistry Institute, Kazan Federal University, Russian Federation.
<http://orcid.org/0009-0004-0090-0292>

e-mail: toxa.mix7@gmail.com

Timur R. Gimadiev, PhD. Sci(Chem), Senior Researcher, Laboratory of automated biochemical technologies, Department of Advanced Research, Federal Research Center «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Science»; Associate Professor, Department of Organic Chemistry, A.M. Butlerov Chemistry Institute, Kazan Federal University, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0001-5012-0308>

e-mail: Timur.Gimadiev@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 29.08.2025

После доработки / Revision 24.11.2025

Принята к публикации / Accepted 30.11.2025

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-03>

УДК [550.35:539.16]:574

EDN CXZMSN

Оригинальная статья / Original paper



Распределение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения
в городах Кавказских Минеральных Вод Ставропольского края
Российской Федерации

Е.А. Буреаева¹  , В.А. Бобылев¹ , И.В. Шишлов², В.И. Ратушный³ 

¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

²Физический факультет Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

³Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация

 buraeva@sfedu.ru

Аннотация. Испытания ядерного оружия, аварии на атомных электростанциях способствовали значительному загрязнению территорий искусственными радионуклидами. При этом разработка уран-ториевых месторождений, наличие природных радиоактивных аномалий вносит наибольший вклад в коллективную эффективную дозу, получаемую населением Земли от природных источников ионизирующих излучений. В данной работе приведены результаты оценки радиационной обстановки в городах Кавказских Минеральных Вод (КМВ) Ставропольского края. В рамках исследования были проведены измерения гамма-фона в таких городах, как: Пятигорск, Кисловодск, Железноводск, Ессентуки и Лермонтов. Гамма-дозиметрия (измерение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма излучения, МЭД) проводилась на центральных улицах, в туристических/парковых зонах городов и в зонах с наиболее плотной застройкой методом пешеходной гамма-съемки на высоте 1 метр над землей при помощи дозиметра радиометра «ДРБП-03» с встроенным блоком детектирования «СБМ-20» и дозиметра-радиометра «ДКС 96» с блоком детектирования «БДКС 96с». Средние значения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) во всех городах составляют порядка 0,15 мкЗв/ч и характерны для населенных пунктов Юга Европейской части России, в том числе зоны наблюдения Ростовской АЭС. В целом, подобные исследования радиационной обстановки в курортных населенных пунктах, особенно в горных условиях, при наличии рудопоявления урана и вулканизма необходимо продолжать как для составления карт распределения МЭД гамма-излучения и выявления возможных природных и/или техногенных радиационных аномалий, так и для снижения социальной напряженности среди населения, связанной с радиофобией.

Ключевые слова: гамма-излучение, мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы, Кавказские Минеральные воды, город-курорт, Ставропольский край, распределение.

Для цитирования: Буреаева Е.А., Бобылев В.А., Шишлов И.В., Ратушный В.И. Распределение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения в городах Кавказских Минеральных Вод Ставропольского края Российской Федерации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):30–36. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-03>

For citation: Buraeva E.A., Bobilev V.A., Shishlov I.V., Ratushnyj V.I. Distribution of ambient equivalent dose of gamma radiation in the cities of the Caucasian Mineral Waters Stavropol Region Russian Federation. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):30–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-03>


Distribution of ambient equivalent dose of gamma radiation in the cities of the Caucasian Mineral Waters Stavropol Region Russian Federation

E.A. Buraeva¹  , V.A. Bobylev¹ , I.V. Shishlov², V.I. Ratushnyj³ 

¹Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

²Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

³Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 buraeva@sfn.ru

Abstract. Nuclear weapons testing and accidents at nuclear power plants have contributed to significant contamination of territories with artificial radionuclides. Furthermore, the development of uranium-thorium deposits and the presence of natural radioactive anomalies make the largest contribution to the collective effective dose received by the Earth's population from natural sources of ionizing radiation. This paper presents the results of assessing the radiation situation in the cities of the Caucasian Mineral Waters (CMV) in the Stavropol Region. As part of the study, gamma background measurements were conducted in the following cities: Pyatigorsk, Kislovodsk, Zheleznovodsk, Yessentuki, and Lermontov. Gamma dosimetry (measurement of the ambient equivalent dose of gamma radiation) was carried out on central streets, in tourist/park areas of cities, and in areas with the most dense development using a pedestrian gamma camera at a height of 1 meter above the ground, using the DRBP-03 dosimeter-radiometer with the SBM-20 built-in detection unit and the DKS 96 dosimeter-radiometer with the BDKS 96s detection unit. The average values of the ambient equivalent dose of gamma radiation (AED, $\mu\text{Sv/h}$) in all cities are approximately 0.15 $\mu\text{Sv/h}$, which is typical for settlements in the southern part of European Russia, including the Rostov NPP. In general, such studies of the radiation situation in resort settlements, especially in mountainous areas with uranium ore deposits and volcanism, should be continued to compile maps of the distribution of gamma radiation and identify possible natural and/or man-made radiation anomalies, as well as to reduce social tensions among the population related to radiophobia.

Keywords: gamma radiation, ambient dose equivalent, Caucasian Mineral Waters, resort town, Stavropol Region, distribution.

Введение

Развитие атомной промышленности, аварии на предприятиях атомной промышленности и испытания ядерного оружия приводят к значительному загрязнению территории радионуклидами. При этом добыча уран-ториевой руды способствует повышению дозовых нагрузок на население и окружающую среду от естественных радионуклидов. Среди городов-курортов Российской Федерации особо выделяются города Кавказских Минеральных Вод (далее – КМВ) с преобладающей туристической и гостиничной деятельностью, огромным комплексом санаториев, пансионатов и лечебно-оздоровительных учреждений различной направленности. КМВ это группа городов-курортов на юге России в Ставропольском крае, включающая в себя Пятигорск, Kislovodsk, Ессентуки, Железноводск, Георгиевск, Лермонтов и Минеральные Воды. Города известны природой и лечебными свойствами горных источников. Пятигорск – главный город объединения, является крупнейшим городом

после Ставрополя по численности населения в крае и крупнейшим по тому же параметру на территории КМВ. Все города КМВ находятся на высоте порядка 500 метров над уровнем моря в окружении гор-лакколитов к северу и востоку от плато «Бермамыт», которое наступает со стороны Kislovodsk. Экономически регион направлен на курортную отрасль, поэтому критически сильно загрязняющие окружающую среду предприятия на его территории практически отсутствуют.

На территории Ставропольского края отсутствуют зоны глобальных радиационных загрязнений (техногенного характера в результате радиационных аварий). Однако на основании результатов радиологических исследований на открытых территориях Предгорного района выявляются радиационные аномалии природного характера, связанные с урановыми рудопроявлениями, а также участки техногенного радиоактивного загрязнения (УРЗ) прошлых лет, образовавшиеся в результате деятельности предприятия по добыче урановых руд, например, бывшие

рудники №1 и №2, а также хвостохранилище, оставшееся после разработок урановой руды бывшего НПО «Алмаз» в г. Лермонтов^{1,2}. Из-за наличия таких объектов, а также из-за географической специфики региона и необходимо тщательное наблюдение за радиационной обстановкой в данном регионе.

По результатам полевых исследований радиационной обстановки прошлых лет в КМВ было установлено, что значения МЭД гамма-излучения на территории КМВ варьируются от 0,15 мкЗв/ч до 0,30 мкЗв/ч. Также необходимо отметить, что в отдельных случаях МЭД достигает 0,5 мкЗв/ч и даже 0,8 мкЗв/ч на некоторых территориях вблизи городов Пятигорска и Лермонтова [1].

Стоит отметить, что общие экологические исследования региона Кавказских Минеральных Вод достаточно малочисленны, а работы, посвященные оценке радиационной обстановки, вообще носят единичный характер.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны наиболее густонаселенные города КМВ: Пятигорск, Кисловодск, Ессентуки, Железноводск и Лермонтов. Гамма-дозиметрия (измерение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма излучения, МЭД) проводилась на центральных улицах, в туристических/парковых зонах городов и в зонах с наиболее плотной застройкой методом пешеходной гамма-съемки на высоте 1 метр над землей при помощи дозиметра радиометра «ДРБП-03» с встроенным блоком детектирования «СБМ-20» и дозиметра-

радиометра «ДКС 96» с блоком детектирования «БДКС 96с».

Результаты и их обсуждение

Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения является параметром, который отражает меру воздействия ионизирующего излучения на биологические ткани и, следовательно, с его помощью можно оценить степень опасности гамма-излучения для человека или группы людей. Для различных групп персонала существуют основные пределы доз, прописанные в Нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009³.

Для анализа общего распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в городах Кавказских Минеральных Вод использовалась диаграмма распределения численности (рис. 1). В таблице 1, в свою очередь, приведены результаты статистического анализа распределения МЭД в данном регионе.

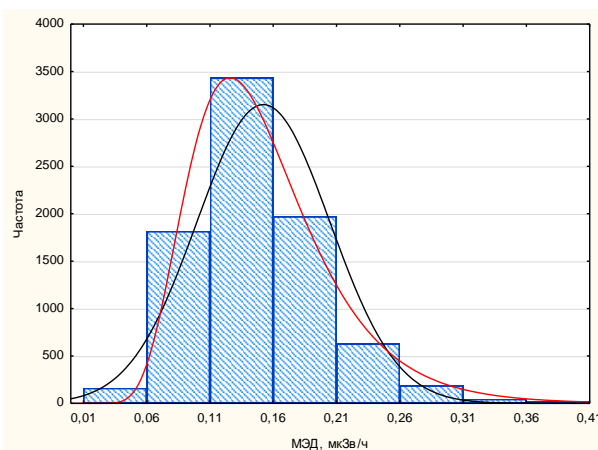


Рисунок 1. Распределение МЭД гамма-излучения на территории городов Кавказских Минеральных Вод [составлено авторами]

Figure 1. Distribution of the gamma radiation MED in the cities of the Caucasian Mineral Waters [compiled by the authors]

¹ О санитарно-эпидемиологической обстановке в Ставропольском крае в 2019 году: Государственный доклад. Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. Ставрополь. 2020. 179 с. Режим доступа: <https://26.rosпотребнадзор.ru/d/du/gd/?ysclid=mizvvyg60ef701561224> (дата обращения: 18.09.2025).

² О санитарно-эпидемиологической обстановке в Ставропольском крае в 2024 году: Государственный доклад. Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. Ставрополь. 2025. 166 с. Режим доступа: <https://26.rosпотребнадзор.ru/d/du/gd/?ysclid=mizvvyg60ef701561224> (дата обращения: 18.09.2025).

³ СанПин 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г. Г. Онищенко от 7 июля 2009 № 47 с 01 сентября 2009 г. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=140797&ysclid=mizwdi6d59753489061> (дата обращения: 18.09.2025).

Таблица 1. Результаты статистической обработки данных по измеренной МЭД гамма-излучения на территории городов Кавказских Минеральных Вод за весь период наблюдения [составлено авторами]

Table 1. Results of statistical processing of data on the measured gamma radiation MED in the cities of the Caucasian Mineral Waters for the entire observation period [compiled by the authors]

| Параметр | Значение |
|--------------------------------|----------|
| Минимум, мкЗв/ч | 0,01 |
| Максимум, мкЗв/ч | 0,46 |
| Среднее арифметическое, мкЗв/ч | 0,15 |
| Среднее геометрическое, мкЗв/ч | 0,14 |
| Медиана, мкЗв/ч | 0,14 |
| Мода, мкЗв/ч | 0,14 |
| Стандартное отклонение, мкЗв/ч | 0,05 |
| Коэффициент вариации, % | 33 |
| Асимметричность, отн. ед. | 0,86 |
| Эксцесс, отн. ед. | 1,71 |
| W-критерий, отн. ед. | 0,96 |
| Количество измерений, шт | 8268 |

Как видно из таблицы 1, средние значения МЭД, мода и медиана совпадают в пределах как стандартного отклонения, так и в пределах погрешности метода полевой гамма-дозиметрии территорий (35%). Положительный эксцесс свидетельствует об островершинности распределения МЭД гамма-излучения. Кроме того, проверка на нормальность критерием Шапиро-Уилка при уровне значимости 0,01, указывает на то, что распределение МЭД сводится к нормальному при значении критерия 0,96 (более 0,5), что полностью соответствует критериям проверки на нормальность.

В связи с вышесказанным, для описания общей радиоэкологической обстановки в городах КМВ далее будет использоваться среднее арифметическое значение МЭД гамма-излучения (0,15 мкЗв/ч, табл.1). Также необходимо подчеркнуть, что в целом подобные величины МЭД гамма-излучения характерны для регионов Юга Европейской части России [2] Нормами радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ-99/2009).

Единичные высокие значения МЭД гамма-излучения могут быть обусловлены местными проявлениями вулканизма, рудопроявлениями урана и связанного с ним по-

вышенного содержания радона в окружающей среде. Результаты, полученные в настоящей работе сопоставимы с данными, полученными в упоминаемых ранее исследованиях, проведенных в регионе (0,15–0,30 мкЗв/ч) [1].

Несмотря на близкое расположение исследуемых городов-курортов, все же каждый из них имеет свои собственные географические, экономические или популяционные особенности, которые напрямую или опосредованно влияют на распределение МЭД гамма-излучения. Сравнительный анализ МЭД в каждом из городов-курортов гамма-фонов городов-курортов КМВ позволит локализовать источник возможного загрязнения, чтобы в последующих исследованиях можно было сосредоточить внимание на проблемном участке.

На рисунке 2 и в таблице 2 представлены особенности распределения МЭД гамма-излучения в отдельных городах КМВ. Средние, модальные и медианные значения МЭД гамма-излучения в Пятигорске, Кисловодске, Железноводске и Ессентуках незначительно отличаются друг от друга и не превышают НРБ-99/2009, что позволяет сделать вывод о том, что влияние, как антропогенных, так и естественных факторов на гамма-фон в каждом из городов сопоставимо.

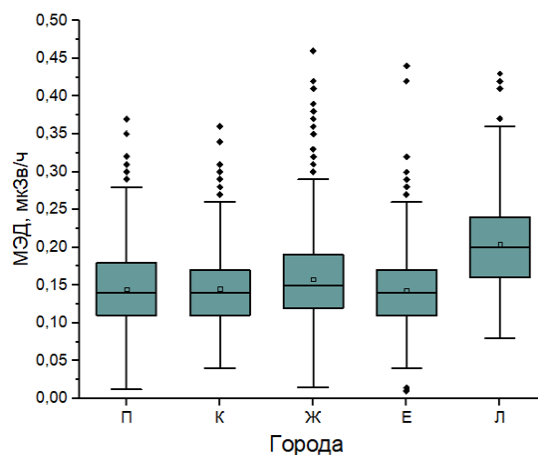


Рисунок 2. Распределение МЭД гамма-излучения в городах КМВ: Пятигорск (П), Кисловодск (К), Железноводск (Ж), Ессентуки (Е), Лермонтов (Л) [составлено авторами]

Figure 2. Distribution of gamma radiation in the cities of the KMV: Pyatigorsk (P), Kislovodsk (K), Zheleznovodsk (Z), Yessentuki (E), Lermontov (L) [compiled by the authors]

Таблица 2. Результаты статистической обработки МЭД гамма-излучения: Пятигорск (П), Кисловодск (К), Железноводск (Ж), Ессентуки (Е), Лермонтов (Л) [составлено авторами]

Table 2. Results of statistical processing of the MED of gamma radiation: Pyatigorsk (P), Kislovodsk (K), Zheleznovodsk (Z), Yessentuki (E), Lermontov (L) [compiled by the authors]

| Параметр | Город | | | | |
|-------------------------|-------|------|------|------|------|
| | П | К | Ж | Е | Л |
| Ср. арифм., мкЗв/ч | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,14 | 0,20 |
| Ср. геом., мкЗв/ч | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,14 | 0,20 |
| Минимум, мкЗв/ч | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,08 |
| Максимум, мкЗв/ч | 0,37 | 0,36 | 0,46 | 0,44 | 0,43 |
| Медиана, мкЗв/ч | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,14 | 0,20 |
| Мода, мкЗв/ч | 0,14 | 0,12 | 0,14 | 0,13 | 0,19 |
| Станд. откл., мкЗв/ч | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 |
| Коэффициент вариации, % | 36 | 33 | 31 | 36 | 30 |
| Кол-во измерений, шт | 2115 | 2029 | 1925 | 1681 | 518 |

Стоит отметить город Лермонтов со средним значением МЭД 0,20 мкЗв/ч (табл. 2), что несколько превышает характерный для Юга России гамма-фон (0,12–0,14 мкЗв/ч [3,4]). В данном случае повышенный фон можно связать с нахождением около города Лермонтова объектов, служивших в прошлом для добычи урана. Для более точной локализации участков с повышенным гамма-фоном в черте города необходимы обширные исследования радиационной обстановки на его территории.

На рисунке 3 и в таблице 3 представлены особенности распределения МЭД гамма-излучения в парковых районах (Тур) и в районах с жилой застройкой и промышленными предприятиями (Урб). Гамма-фон как в парковых, так и в жилых зонах городов-курортов КМВ сопоставим в пределах стандартного отклонения.

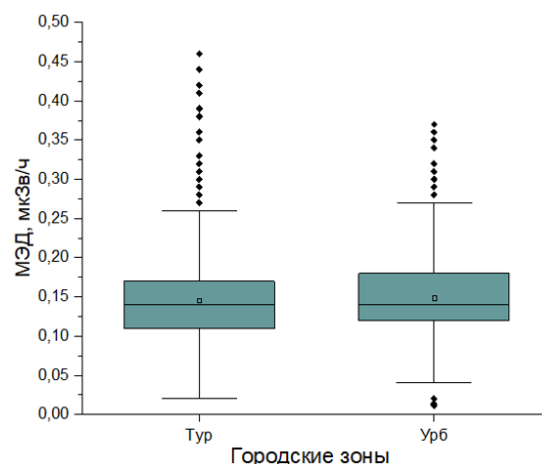


Рисунок 3. Распределение МЭД гамма-излучения на территориях, дифференцированных по степени антропогенного влияния. Тур – парковые городские зоны, Урб – зоны с жилой застройкой [составлено авторами]

Figure 3. Distribution of the gamma radiation MRE in areas differentiated by the degree of anthropogenic influence. Tur – park urban areas, Urb – residential areas [compiled by the authors]

Таблица 3. Результаты статистической обработки данных по измеренной МЭД гамма-излучения: Тур – парковые городские зоны, Урб – зоны с жилой застройкой [составлено авторами]

Table 3. Results of statistical processing of data on the measured gamma radiation MRE: Tur – park urban areas, Urb – residential areas [compiled by the authors]

| Параметр | Зона | |
|--------------------------------|------|------|
| | Тур | Урб |
| Минимум, мкЗв/ч | 0,02 | 0,01 |
| Максимум, мкЗв/ч | 0,46 | 0,37 |
| Среднее арифм., мкЗв/ч | 0,15 | 0,15 |
| Среднее геом., мкЗв/ч | 0,14 | 0,14 |
| Стандартное отклонение, мкЗв/ч | 0,05 | 0,05 |
| Количество измерений, шт | 2807 | 4943 |

Заключение

Анализ особенности распределения гамма-фона на территориях городов Кавказских Минеральных Вод показал, что МЭД в исследованных населенных пунктах не превышает значений, рекомендованных Нормами радиационной безопасности НРБ 99/2009 Российской Федерации (0,30 мкЗв/ч) и в среднем составляет 0,15 мкЗв/ч. Не выявлены значимые различия в уровнях МЭД гамма-излучения в различных городах КМВ.

В целом, подобные исследования радиационной обстановки в курортных населенных пунктах, особенно в горных условиях,

при наличии рудопроявления урана и вулканизма необходимо продолжать как для составления карт распределения МЭД гамма-излучения и выявления возможных природных и/или техногенных радиационных аномалий, так и для снижения социальной напряженности среди населения, связанной с радиофобией.

Необходимо подчеркнуть, что подобные исследования могут служить «нулевым фоном» для конкретных территорий с особенными природно-климатическими и геологическими условиями, что особо актуально для горных регионов с естественным повышенным радиационным фоном от горных пород

и радона. Данные о распределении гамма-фона в регионах в дальнейшем могут быть использованы для однозначной идентификации возможных техногенных воздействий на экосистемы и население, что особо актуально при оценке радиационной обстановки вблизи объектов, служивших в прошлом для добычи урана, а также для зон наблюдения объектов атомной энергетики.

Таким образом, исследование пространственного распределения МЭД гамма-излучения в рекреационных зонах необходимо и для верификации моделей распространения радиоактивных элементов от объектов ядерной топливной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Khorzova L.I., Sidyakin P.A., Yanukyuan E.G. Radiation situation at construction sector objects in Caucasus Mineral Waters region and prospects of its decrease. *International conference on industrial engineering*. 2016;150:2031–2035. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.289>
2. Плахотняя Д.П., Бураева Е.А., Ратушный В.И. Радиоэкологическая обстановка на отдельных территориях Южного федерального округа. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):22–28. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-03>
- Plahotnyaya D.P., Buraeva E.A., Ratushnyj V.I. Radioecological situation in certain areas of the Southern Federal District. *Nuclear Safety*. 2024;14(1):22–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-03>
3. Buraeva, E.A., Malomyzheva, N.V. Distribution of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in specially protected natural areas of the Rostov region. *Radiation and Risk*. 2023;32(2):120–131. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-2-120-131>
4. Бураева Е.А., Маломыжева Н.В., Каменев О.В. Особенности распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в крупных промышленных центрах Ростовской области. *Экология промышленного производства*. 2022;4:54–59. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2022_4_54
- Buraeva E.A., Malomyzheva N.V., Kamenev O.V. Features of the Distribution of the Equivalent Dose Power of Gamma Radiation in Large Industrial Centers of the Rostov Region. *Ecology of industrial production*. 2022;4:54–59. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2022_4_54

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бураева Е.А. – общее руководство работой, выполнение измерений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в регионах Ставропольского края, написание и редактирование текста статьи, обобщение и анализ данных, подбор литературных источников;

Бобылев В.А. – выполнение измерений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в регионах Ставропольского края, обработка и статистический анализ данных, оформление статьи, подбор литературных источников;

Шишлов И.В. – выполнение измерений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в регионах Ставропольского края, обработка и статистический анализ данных, оформление статьи, подбор литературных источников;

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Buraeva E.A. – general management of the work, measurements of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the in the Stavropol Region districts, writing and editing the text of the article, summarizing and analyzing data, selecting literary sources;

Bobylev V.A. – performing measurements of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the Stavropol Region districts, processing and statistical analysis of data, preparation of the article, selection of literary sources;

Shishlov I.V. – performing measurements of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the Stavropol Region districts, processing and statistical analysis of data, preparation of the article, selection of literary sources;

Ратушный В.И. – общее руководство работой, написание и редактирование текста статьи, обобщение и анализ данных, подбор литературных источников.

Ratushnyj V.I. – general management of the work, writing and editing the text of the article, summarizing and analyzing data, selecting literary sources.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(ГЗ0110/23-11-ИФ).

FUNDING:

The research was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment in the field of scientific activity 2023). Project No. FENW-2023-0010/(GZ0110/23-11-IF).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

БЛАГОДАРНОСТЬ:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/ГЗ0110/23-11-ИФ).

ACKNOWLEDGMENTS:

The research was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment in the field of scientific activity 2023). Project No. FENW-2023-0010/(GZ0110/23-11-IF).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Бураева Елена Анатольевна, кандидат химических наук, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-0928-1617>
e-mail: buraeva@sfedu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Elena A. Buraeva, Cand. Sci. (Chem.), Dr. Sci. (Bio.), Associate Professor, Leading Researcher, Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-0928-1617>
e-mail: buraeva@sfedu.ru

Бобылев Вячеслав Александрович, лаборант-исследователь, Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-2214-0616>
e-mail: bobylev@sfedu.ru

Vyacheslav A. Bobylev, Research Assistant, Scientific Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-2214-0616>
e-mail: bobylev@sfedu.ru

Шишлов Иван Владимирович, ассистент кафедры общей физики, аспирант 1 года обучения, физический факультет, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.
e-mail: shishlov@sfedu.ru

Ivan V. Shishlov, Assistant of the Department of General Physics, 1st-year postgraduate student, Faculty of Physics, Southern Federal University; Rostov-on-Don, Russian Federation.
e-mail: shishlov@sfedu.ru

Виктор Иванович Ратушный, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>
e-mail: IRatushnyj@mephi.ru

Viktor I. Ratushnyj, Dr. Sci. (Phys. and Math), Professor, Head of the Department of Physical and Mathematical Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>
e-mail: IRatushnyj@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 09.10.2025

После доработки / Revision 10.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.12.2025

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-2025-04-04>

УДК 621.1:536.24

EDN DDYEFW

Оригинальная статья / Original paper



Технические решения и технологические методы повышения
эффективности сепараторов-пароперегревателей в составе оборудования
АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

В.М. Терехов¹, Л.И. Миронова²  , М.Ю. Хижов³

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва,
Российская Федерация

³АО Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Московская обл., Российская Федерация

 miroнова_lub@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены конструкции теплообменных кассет сепараторов-пароперегревателей повышенной эффективности в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Одной из основных проблем в турбинах АЭС, работающих на насыщенном паре, является уменьшение влагосодержания в проточной части турбины и дефицит температуры греющего пара, что приводит к необходимости модернизации существующих конструкций сепараторов-пароперегревателей и увеличения их теплоотдачи. Некоторые предложенные технические решения и технологические методы повышения эффективности теплообменных аппаратов заключаются в увеличении поверхностей теплоотдачи с применением более разветвленной поверхности теплообменных труб. Такими конструкциями являются теплообменные кассеты пароперегревателей, состоящие из большого числа теплообменных труб с шестью и восемью П-образными продольными ребрами, проекты СПП-1000 и СПП-1200 соответственно. Отмечено, что кассеты с шестью П-образными продольными ребрами не обеспечивают дефицит температуры греющего пара в 6°C для более мощных установок энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200. Вполне приемлемым техническим решением в выполнении такого требования является применение в кассетах теплообменных труб с восемью П-образными продольными ребрами. Приведены достоинства и недостатки рассматриваемой конструкции продольно оребренных труб. Основными недостатками труб с восемью П-образными ребрами являются повышенная металлоемкость теплообменных кассет и отсутствие условий массового производства труб такого класса. Рассмотрено техническое решение, заключающееся в применении теплообменных кассет пароперегревателя с низкопрофильными монометаллическими трубами и позволяющего сохранить модульный принцип построения всех блоков в существующих ранее конструкциях. Изложены подходы к выбору заготовок теплообменных труб с учетом выпускаемого сортамента мировых и отечественных фирм-производителей. Приведены некоторые результаты исследований структуры и физико-механических свойств теплообменных труб с целью оптимального выбора теплообменных труб для СПП повышенной эффективности, что целесообразность предлагаемых технических решений по модернизации СПП должна быть обоснована результатами тепло-гидравлических расчетов, а также сравнением технических характеристик конструкций до и после модернизации.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, сепаратор-пароперегреватель, теплообменные трубы, коэффициент теплоотдачи, поверхность теплообмена.

Для цитирования: Терехов В.М., Миронова Л.И., Хижов М.Ю. Технические решения и технологические методы повышения эффективности сепараторов-пароперегревателей в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):37–47. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-04>

For citation: Terekhov V.M., Mironova L.I., Khizhov M.Yu. Engineering solutions and process methods to increase the efficiency of moisture separator-reheaters being an equipment part of NPPs with VVER-1000 and VVER-1200. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):37–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-04>


Engineering solutions and process methods to increase the efficiency of moisture separator-reheaters being an equipment part of NPPs with VVER-1000 and VVER-1200

Viktor M. Terekhov¹, Lyubov I. Mironova²  , Mikhail Yu. Khizhov³

¹Moscow Engineering Physics Institute «MEPhI», Moscow, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

³JSC ECB «GIDROPRESS», Podolsk, Moscow region, Russian Federation

 mironova_lub@mail.ru

Abstract. The article considers the designs of heat-exchanging cartridges of moisture separator-reheaters (MSRs) of increased efficiency being a part of the equipment of NPPs with VVER-1000 and VVER-1200. One of the main problems of NPP saturated steam turbines is the reduced moisture content in the turbine flow part and the deficiency in the heating steam temperature resulting in the need to modify the existing designs of moisture separator-reheaters and increase their heat transfer. Some proposed engineering solutions and process methods for improving the efficiency of heat-exchangers lie in increasing the heat transfer surfaces using a more branched surface of heat-exchanging tubes. Such designs are heat-exchanging cartridges of reheaters, consisting of a large number of heat-exchanging tubes with six and eight longitudinal U-fins, MSR designs SPP-1000 and SPP-1200, respectively. It is noted that cartridges with six longitudinal U-fins do not provide the heating steam temperature deficiency of 6 °C for more powerful facilities of NPP Power Units with VVER-1200. An appropriate engineering solution for meeting this requirement is the application of heat-exchanging tubes with eight longitudinal U-fins in the cartridges. The article contains advantages and disadvantages of the considered design of longitudinally finned tubes. The main disadvantages of tubes with eight U-fins are the increased metal consumption per heat-exchanging cartridges and the lack of conditions for large-scale production of tubes of such class. We considered the engineering solution to apply the reheater heat-exchanging cartridges with low-profile monometallic tubes, allowing keeping the modular principle of construction of all units in previously existing designs. The article states approaches to the selection of heat-exchanging tube blanks subject to the range of products manufactured by global and domestic manufacturers. Some results of studies of the structure and physical and mechanical properties of the heat-exchanging tubes are shown for optimal selection of heat-exchanging tubes for MSR SPP-1200. It is noted that the feasibility of the proposed engineering solutions for modification of MSRs should be supported by the results of thermal and hydraulic calculations as well as a comparison of the technical characteristics of the designs before and after the modification.

Keywords: water-moderated water-cooled power reactor, moisture separator-reheater, heat exchange tubes, heat transfer coefficient, heat exchange surface.

Введение

За короткий исторический промежуток времени ядерная энергетика стала частью мирового энергетического баланса. При этом с каждым годом доля атомных электростанций в мировом производстве электроэнергии возрастает. Так, например, на мировых площадках функционируют 450 энергоблоков в 30 странах, суммарная установленная мощность которых составляет около 400 ГВт. Специалисты отмечают, что глобальные ядерные энергетические мощности будут расти в период до 2040-х гг. более быстрыми темпами по сравнению с нулевыми годами двадцать первого века. Прогнозируется увеличение мощности до 569 ГВт к 2040 году¹.

В ближайшее время будут введены в эксплуатацию новые АЭС: «Ханхикиви» (Финляндия), «Аккую» (Турция), «Эль-Дабаа» (Египет), «Руппур» (Бангладеш) и др., а также новые энергоблоки на действующих станциях: «Пакш» (Венгрия), «Бушер» (Иран), «Куданкулам» (Индия), «Тяньвань» (Китай), Белорусская АЭС и другие, действующие на территории Российской Федерации.

Новые перспективные проекты АЭС ориентированы на увеличение мощности, как единичных агрегатов, так и мощности энергоблоков в целом, что возможно осуществить не только за счет проектирования и строительства новых, но и модернизации отдельных агрегатов в цепочке АЭС. При этом, некоторые новые проекты реакторных установок предусматривают увеличение установленной мощности более 1200 МВт. Здесь весьма важным является повышение

¹World Nuclear Association – Режим доступа: <https://world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/nuclear-fuel-report> (дата обращения: 07.07.2025).

эффективности работы оборудования за счет внедрения новых технических решений применительно, как к конструкции теплоэнергетических агрегатов, так и технологическим методам их изготовления.

Известно, что на Российских АЭС широко применяются двухконтурные энергоблоки с водо-водяными реакторами. В активной зоне реактора происходит нагрев теплоносителя (воды) до температуры насыщения и его частичное испарение. Далее происходит разделение насыщенной воды и пара, сепарация влаги из насыщенного пара. Затем пар поступает в турбоустановку, где осуществляет работу, генерируя ее в электроэнергию.

Одной из основных проблем в турбинах АЭС, работающих на насыщенном паре, является уменьшение влагосодержания в проточной части турбины и дефицит температуры греющего пара. Пар, поступающий в турбину, уже содержит около 0,3% влажности. При отсутствии влагоотделителей в турбоустановке, влажность в последних ступенях турбины может достигнуть 24%. Это в значительной степени отражается на снижении внутреннего КПД турбины, и приводит к недопустимому уровню эрозии лопаток турбины [1]. Кроме этого, возникает проблема дефицита температуры греющего пара.

Для предотвращения эрозии турбинных лопаток применяются различные методы, к числу которых относится отвод влаги при помощи различных сепарационных устройств, например, сепараторов-пароперегревателей (СПП).

Анализу конструкций сепараторов-пароперегревателей (СПП-220М, СПП 1000 и др.) посвящено немало работ [1–5], где отмечены их достоинства и недостатки. Большое внимание уделяется кассетам пароперегревателя, состоящих из большого числа теплообменных оребренных труб различного вида: продольного и поперечного оребрения [4]. Повышение эффективности теплоотдачи таких устройств в большинстве случаев связано с увеличением площади поверхности теплообменных труб, достигаемым различными технологическими методами (шайбованием, приваркой ребер, спи-

ральным оребрением труб токами высокой частоты, получением ребер на поверхности трубы методом пластического обжима и т.д.). При этом зачастую не рассматриваются проблемы технологического характера, связанные с изготовлением теплообменных аппаратов, решение которых имеет первостепенное значение в повышении конкурентоспособности отечественного энергетического оборудования и обеспечении импортозамещения товаров российского производства. Также следует отметить, что детальное сравнение существующих конструктивных исполнений теплообменных кассет с учетом мирового опыта лидеров производителей в настоящий момент проведено в недостаточной степени. Целью статьи является проведение анализа технических решений и технологических методов повышения эффективности сепарационных устройств в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Конструкторско-технологические решения в повышении эффективности СПП-1000 и СПП-1200

Модели сепараторов-пароперегревателей СПП-1000, СПП-1200 разрабатывались и изготавливаются в настоящее время на АО «ЗиО-Подольск». С точки зрения конструктивного исполнения они характеризуются модульным построением, состоящим из набора унифицированных сепарационных блоков и пароперегревательных модулей (кассет).

Существующие сепарационные устройства для АЭС с ВВЭР-1000 предусматривают применение теплообменных труб, состоящих из матричной трубы с приваренными к ней продольными П-образными ребрами в количестве шести штук [6], что недостаточно для преодоления дефицита температуры греющего пара в 6°C и для работы в условиях АЭС с ВВЭР-1200. Для повышения температуры греющего пара самым простым решением было бы увеличение поверхности теплообмена аппарата путем увеличения длины кассет. Однако такой подход несет за собой ряд трудностей, главная из которых – увеличение габаритов аппарата, что, соответственно, приведет к его удоро-

жанию, проблемам транспортировки и монтажа.

Одним из технических решений в модернизации СПП-1000 было предложение ввода кассеты нового поколения с повышенным количеством продольных ребер до восьми штук. Такое решение нашло применение в проекте СПП-1200 в составе оборудования для АЭС с ВВЭР-1200.

Для успешной реализации данного проекта было разработано и изготовлено уникальное технологическое оборудование с воз-

можностью мониторинга качества приварки П-образных ребер к матричной трубе [7,8].

С целью проведения анализа эффективности теплообменных поверхностей в рассматриваемых оребренных трубах введем следующие обозначения. Трубу с шестью П-образными ребрами будем обозначать как модель 1, трубу с восемью П-образными ребрами – модель 2. На рисунке 1 показаны поперечные сечения рассматриваемых моделей, в таблице 1 приведены их исходные геометрические параметры.

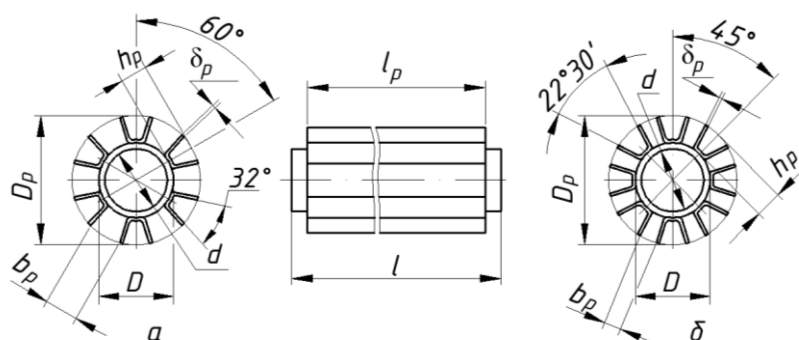


Рисунок 1. Конструктивные исполнения моделей: а – модель 1 с шестью П-образными ребрами, б – модель 2 с восемью П-образными ребрами [составлено авторами]

Figure 1. Design versions of models: a – model 1 with six U-shaped ribs, b – model 2 with eight double U-shaped edges [compiled by the authors]

Таблица 1. Исходные геометрические параметры моделей [составлено авторами]

Table 1. Initial geometric parameters of the models [compiled by the authors]

| Исполнение | n | d , мм | D , мм | D_p , мм | h_p/b_p | δ_p/h_p | l_p/l | $\varphi = H_p/H_0$ |
|------------|-----|----------|----------|------------|-----------|----------------|---------|---------------------|
| Модель 1 | 6 | 12 | 16 | 33 | 3,211 | 0,0941 | 0,828 | 0,546 |
| Модель 2 | 8 | 12 | 16 | 34 | 4,56 | 0,0912 | 0,828 | 0,757 |

Здесь приняты следующие обозначения: φ – коэффициент оребрения; H_p – поверхность ребер; H_0 – условная поверхность несущей трубы.

Основными отличиями конструкции трубы с восемью ребрами является их больший диаметр по оребренной части – 33,54 мм, большая высота ребра – 8,8 мм, меньший угол раскрытия двойного ребра $22^\circ 30'$ и меньший шаг приварки двойных (П-образных) ребер на несущую (матричную) трубу – 1,72 мм.

Сравнительные параметры теплообменных труб с шестью и восемью двойными П-образными ребрами с точки зрения оценки теплообменных поверхностей приведены в таблице 2.

Из приведенных данных следует, что увеличение площади поверхности ребер пропорционально произведению отношения высот ребер и числа ребер и соответствует 1,38.

При расчете конвективного теплообмена используются зависимости для определения чисел Нуссельта и коэффициентов теплоотдачи, формула (1) [9]

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{d_s}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта;

λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя при средней температуре потока;

d_s – характерный размер, соответствующий данной конфигурации канала.

Таблица 2. Сравнительные параметры теплообменных труб с шестью и восемью двойными П-образными ребрами [составлено авторами]

Table 2. Comparative parameters of pipe models with six and eight double U-shaped edges [compiled by the authors]

| № п/п | Характеристики труб | Труба из шести ребер (модель 1) | Труба из восьми ребер (модель 2) |
|-------|---|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Длина трубы модели, мм | 4710 | 4710 |
| 2 | Длина оребренной части, мм | 3900 | 3900 |
| 3 | Количество одиночных ребер, шт | 12 | 16 |
| 4 | Высота ребра, мм | 8,5 | 8,8 |
| 5 | Толщина ребра, мм | 0,8 | 0,8 |
| 6 | Развернутая длина корыта, образованного двумя ребрами, мм | 20 | 20 |
| 7 | Диаметр по вершинам ребер, мм | 33 | 33,54 |
| 8 | Отношение поверхности ребер к полной поверхности трубы | 0,793 | 0,84 |
| 9 | Отношение поверхности трубы, не занятой ребрами, к полной поверхности трубы | 0,207 | 0,16 |
| 10 | Коэффициент оребрения | 0,546 | 0,757 |
| 11 | Живое сечение для прохода воздуха, м ² | 1,155 × 10 ⁻³ | 1,123 × 10 ⁻³ |
| 12 | Живое сечение для прохода воды, м ² | 1,131 × 10 ⁻⁴ | 1,131 × 10 ⁻⁴ |
| 13 | Эквивалентный гидравлический диаметр модели, мм | 13,31 | 10,05 |
| 14 | Полная поверхность оребренной трубы, м ² | 1,07 | 1,482 |

Следует отметить, что специфичность процесса теплообмена ребристых поверхностей вызывает необходимость учитывать не только конвективную теплоотдачу, но и учитывать теплопроводность ребер².

Конвективная теплоотдача продольно обтекаемых пучков из труб с продольными ребрами при течении перегретого водяного пара для $Re=2 \times 10^3 \div 2 \times 10^5$ и равномерном заполнении сечения теплообменными трубами описывается формулой (2)³:

$$Nu = 0,332 Re^{0,75} Pr^{0,33} \left(0,2 + \frac{1}{1 + 0,167 (h_p / b_2)^3} \right), \quad (2)$$

где Nu – величина критерия Нуссельта нагреваемого пара;

Re – величина критерия Рейнольдса нагреваемого пара;

Pr – величина критерия Прандтля нагреваемого пара;

h_p – высота ребра, м;

b_2 – ширина зазора между вершинами ребер, м.

Ширину зазора между вершинами ребер определим по формуле (3):

$$b_2 = \frac{\pi D_p}{n_p} - \delta_2, \quad (3)$$

где D_p – диаметр оребренной части, м;

n_p – количество единичных ребер;

δ_2 – толщина ребер у вершины, м.

Расчеты по формулам (2) и (3) показали, что для трубы с шестью двойными (двенадцатью единичными) ребрами зависимость (2) имеет вид выражения (4):

$$Nu_6 = 0,034 Re^{0,75} Pr^{0,33}. \quad (4)$$

Для трубы с восемью двойными (шестнадцатью единичными) ребрами имеем выражение (5):

$$Nu_8 = 0,0239 Re^{0,75} Pr^{0,33}. \quad (5)$$

Сравнивая величины критерия Нуссельта из выражений (4) и (5) для труб с различными числами продольных ребер, отметим, что увеличение числа ребер не приводит к более интенсивному конвективному теплообмену свободной от ребер внешней поверхности, поскольку определяющим параметром

² РТМ 24.031.05-72. Методика и зависимости для теоретического расчета теплообмена и гидравлического сопротивления теплообменного оборудования АЭС. – Ленинград: НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова; Москва: Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения, 1974. – 124 с. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293764/4293764047.pdf?ysclid=mi4olmozg2386107533> (дата обращения: 07.07.2025).

³ Отчет НИОКР №ЭЦР-0613. Теплогидравлические испытания продольно-оребранных труб пароперегревателя СПП-1000-1. – Подольск: ПАО «ЗиО-Подольск», 2017. – 51 с. – Режим доступа: по запросу.

в этих формулах является величина зазора между ребрами. Очевидно, что с увеличением числа ребер при всех других равных параметрах, величина зазора между ребрами уменьшается. Это следует из формулы (1) и наглядно подтверждается соотношением коэффициентов теплоотдачи рассматриваемых конструкций в выражении (6):

$$\frac{\alpha_6}{\alpha_8} = \frac{Nu_6 d_{r8}}{Nu_8 d_{r6}} = 1,074, \quad (6)$$

где d_{r6} и d_{r8} – эквивалентный гидравлический диаметр трубного пучка пароперегревателя с двенадцатью и шестнадцатью единичными ребрами.

Эквивалентный гидравлический диаметр трубного пучка пароперегревателя СПП с двенадцатью единичными ребрами равен $d_{r6} = 13,31$ мм, с шестнадцатью единичными ребрами – $d_{r8} = 10,05$ мм (см. табл. 2). Поэтому в теплообменных трубах таких конструкций интенсивность теплоотдачи реализуется за счет эффективности дополнительных ребристых поверхностей, которые характеризуется вспомогательными параметрами, в частности, коэффициентом оребрения и соответствующим отношением поверхности ребер к полной поверхности трубы.

Оценка эффективности труб с продольным внешним оребрением при продольном обтекании перегретым паром проводится по приведенному коэффициенту эффективности⁴ α^{np} , формула (7):

$$\alpha^{np} = \left[\frac{H_p}{H_n} E + \frac{H_{mp}}{H_n} \right] \psi \alpha, \quad (7)$$

где H_p / H_n – отношение поверхности ребер к полной поверхности трубы;

H_{mp} / H_n отношение поверхности трубы, не занятой ребрами, к полной поверхности трубы; E – коэффициент интенсивности ребра, зависящий от коэффициента теплопроводности ребра и от его толщины;

ψ – коэффициент оребрения.

Принимая во внимание, что величины E , α для труб с шестью и восемью двойными П-образными ребрами одинаковы, а выражение в квадратной скобке формулы (7) отличается незначительно, то оценку эффективности рассматриваемых продольно оребренных труб проведем по соотношению коэффициентов оребрения. Тогда получаем выражение (8):

$$\frac{\alpha_8^{np}}{\alpha_6^{np}} = 1,38. \quad (8)$$

Откуда следует, что увеличение поверхности теплообмена в 1,38 раза превышает снижение коэффициента теплоотдачи α_8 в 1,074 раз при равных числах Re и Pr.

Таким образом, конструкция СПП-1200 является проектом повышенной эффективности по сравнению с проектом СПП-1000 в составе оборудования для АЭС с ВВЭР 1000. Для сравнения приведем основные конструктивные показатели рассматриваемых сепарационных устройств, таблица 3.

Очевидно, что проект СПП-1200, несмотря на повышенную эффективность при равных условиях размещения труб в кассетах пароперегревателей, имеет более высокую металлоемкость по сравнению с СПП-1000. Кроме этого, массовое производство теплообменных труб такого класса отсутствует в мировой и отечественной промышленности. Отсюда возникает потребность в поиске новых технических решений, направленных на повышение эффективности теплообменных кассет пароперегревателя и снижение габаритно-весовых характеристик с соблюдением модульного принципа размещения всех блоков конструкции.

Технические решения по созданию перспективных конструкций теплообменных кассет в СПП нового поколения

Одним из перспективных направлений увеличения поверхности теплоотдачи, как уже было ранее сказано, является создание прогрессивных кассетных блоков сепараторов-пароперегревателей с применением более разветвленной поверхности теплообменных труб.

⁴ РТМ 108.020.107-76. Тепловой и гидравлический расчет промежуточных сепараторов-пароперегревателей турбин насыщенного пара АЭС. – Ленинград: НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова, 1978. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293768/4293768751.pdf?ysclid=mi4pyuq8gy569546332> (дата обращения: 26.05.2025).

Таблица 3. Конструктивное исполнение сепараторов-перегревателей в составе оборудования ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 [составлено авторами]**Table 3.** Design of moisture separator-reheaters being a part of VVER-1000 and VVER-1200 equipment [compiled by the authors]

| Проект | Число кассет на ступени, шт | Число оребренных труб в кассете, шт. | Тип продольного оребрения | Диаметр матричной трубы, мм | Длина оребренной части, мм | Число оребренных труб на один аппарат, шт. |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|
| ВВЭР-1000 СПП-1000 | 187 | 37 | с шестью П-образными ребрами | 16 | 3900 | 6919 |
| ВВЭР-1200 СПП-1200 | 222 | 37 | с восемью П-образными ребрами | 16 | 3355 | 8214 |

При создании компактного сепаратора пароперегревателя повышенной эффективности, следует выделить новое техническое решение: разработка и изготовление кассетного блока с низкопрофильными монометаллическими трубами.

Предложения о применении труб с низким оребрением в отечественной практике производства теплообменных аппаратов не являются новыми. Так, например, в статье [4] изложены технические решения и обсужден проект модернизации конструкций СПП-220М и СПП-1000, эксплуатируемых на действующих энергоблоках АЭС соответственно с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. В частности, было предложено использовать в пароперегревателе трубки с низким оребрением из эрозионных материалов, например, стали ХЗСгТi17, которая характеризуется высокой термоэластичностью и устойчивостью к тепловому растрескиванию. Однако, не следует забывать, что применение труб из новых материалов требует разработки не только технологических методов их получения в заготовительном переделе, но и технологии закрепления труб в трубных досках. Последняя является определяющей технологической операцией в обеспечении эксплуатационной надежности теплоэнергетических аппаратов.

В таком случае существенно увеличиваются сроки внедрения проектных предложений, связанные, прежде всего, с решением вопросов производственного характера (поставкой требуемого объема заготовок, размещением и переналадкой оборудования производственных площадок, техническим оснащением и т.д.).

С точки зрения заготовительного производства низкопрофильные монометаллические трубы могут быть получены методом экструзии или профилированием методом пластической деформации (накаткой роликами при условии вращения трубы или блоков роликов). Процесс оребрения труб накаткой выполняется путем продавливания металла трубы роликами с последующими технологическими переделами: безокислительной термической обработкой токами высокой частоты оребренной части и токовихревым контролем.

В качестве заготовок для профилирования труб используют бесшовные холоднокатанные или горячекатанные трубы и сварные трубы. При равной толщине стенок бесшовные трубы прочнее, поскольку шов является потенциально слабым местом. В таблице 4 приведены основные характеристики низкопрофильных труб.

Таблица 4. Основные характеристики низкопрофильных труб [составлено авторами]**Table 4.** Main characteristics of low-profile tubes equipment [compiled by the authors]

| Заготовка трубы | Материал | Размеры монотрубы, мм | Высота ребра, мм | Толщина стенки после оребрения, мм | Количество ребер | Коэффициент оребренности |
|--|----------|-----------------------|------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Сварная труба (электросварные прямошовные трубы) | Тр439 | ∅19,05x1,65 | 1,3 | 0,8 | 27 ⁺² ребер /1" | 1,49 |
| Бесшовная холоднокатаная труба | 08Х14МФ | ∅19x1,5 | 1,5 | 0,8 | 27 ⁺² ребер /1" | 1,49 |

Модель низкопрофильной трубы диаметром 19x1,65 мм с поперечным однозаходным винтовым оребрением приведен на рисунке 2.

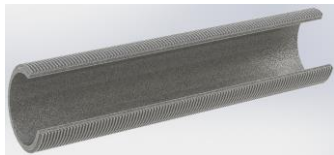


Рисунок 2. Низкопрофильная труба $\varnothing 19 \times 1,65$ мм. Модель [составлено авторами]

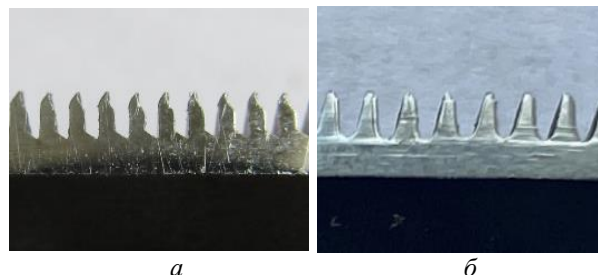
Figure 2. $\varnothing 19 \times 1.65$ mm low-profile tube. Model equipment [compiled by the authors]

Основной проблемой в изготовлении конструкции сепаратора-параперегревателя повышенной эффективности является обеспечение производства сепарационных устройств большим количеством труб с заданными параметрами теплообменной поверхности, что требует тщательного анализа в выборе фирмы производителя.

Анализ литературных источников, а также патентных исследований [10,11] показал, что в мире существует всего несколько фирм, производящих монометаллическую низкопрофильную теплообменную трубу, в числе которых: «Schmole Gmbh» (Германия), «Wieland» (Германия), «Wieland Thermal Solutions» (Португалия), «Neotiss»

(Vallourec) (Франция). Среди Российских разработок известен только один метод формирования профиля теплообменной трубы – механический метод профилирования затылованной частью режущего инструмента – резца (технология МВТУ им. Баумана). Однако этот метод является низкоэффективным из-за его малой производительности и ряда других факторов, например, большого количества концентраторов напряжения, образующихся во впадинах профиля, что снижает прочность теплообменных труб. Профиль теплообменной трубы в зависимости от метода изготовления ее рабочей части приведен на рисунке 3.

Следует отметить, что в опубликованных литературных источниках практически отсутствует информация о формировании рабочего профиля теплообменной трубы методом поверхностно-пластического деформирования: профилирующих станах, накатном



a *б*

Рисунок 3. Профиль теплообменной трубы в зависимости от метода изготовления ее рабочей части:

a – метод нарезки резцом (технология МВТУ им. Баумана, Россия), *б* – метод накатки (технология фирмы «Schmole Gmbh», Германия) [составлено авторами]

Figure 3. Heat-exchanging tube profile depending on the manufacturing method of its operating part: *a* – cutting method (procedure of Bauman Moscow State Technical University, Russia), *b* – rolling method (procedure of Schmole Gmbh, Germany) [compiled by the authors]

инструменте (его геометрии и материале) и режимах накатки, термическом оборудовании и режимах безокислительной термической обработки, оборудовании и методике вихретокового контроля. Все это является предметом углубленного анализа эксплуатационных параметров низкопрофильных теплообменных труб в зависимости от технологии их изготовления, сборки и монтажа теплообменных кассет, а также проведения комплексных испытаний (теплоаэродинамических, испытаний на циклическую и термоциклическую прочность).

В силу краткости изложения приведем выборочные результаты исследования геометрических параметров и физико-механических свойств монометаллических низкопрофильных теплообменных труб, на основе которых был сделан выбор заготовки. Рассматривалась продукция ведущих иностранных фирм: «Schmole Gmbh», «Wieland» (Германия); «Wieland Thermal Solutions» (Португалия); «Neotiss» (Vallourec) (Франция) и отечественных производителей АО «Дипем-Я», МВТУ им. Баумана Н.Э. Разработанная методика проведения исследований заключалась в следующем. Были отобраны образцы труб указанных производителей. Исследования структуры и микротвердости рабочей поверхности теплообменных труб

Таблица 5. Результаты измерений геометрических параметров оребренной части трубы. Средние значения [составлено авторами]

Table 5. Measurement results of tube finned section geometry. Average values [compiled by the authors]

| Фирма | Высота ребра, мм | Ширина ребра в средней части, мм | Ширина ребра в вершине, мм | Толщина стенки, мм |
|---------------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Schmole GmbH | 1,472 | 0,294 | 0,196 | 1,198 |
| Wieland | 1,421 | 0,378 | 0,1 | 0,915 |
| Wieland Thermal Solutions | 1,619 | 0,218 | 0,021 | 0,678 |
| Neotiss | 1,126 | 0,576 | 0,206 | 0,91 |
| Дипем-Я | 1,195 | 0,472 | 0,119 | 1,218 |

Таблица 6. Результаты замера микротвердости. Средние значения [составлено авторами]

Table 6. Microhardness measurement results. Average values [compiled by the authors]

| Фирма | Продольное сечение | |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Значение твердости под ребром, HV5 | Значение твердости между ребрами, HV5 |
| Schmole GmbH | 215-221; 216-223; 213-214; 216-221 | 212-225; 215-217; 214-215; 215-218 |
| Wieland | 197-202; 201-203; 207-208; 199-208 | 200-218; 199-208; 203-217; 197-208 |
| Wieland Thermal Solutions | 179-183; 173-176; 172-180; 171-186 | 176-182; 172-184; 168-174; 169-178 |
| Neotiss | 175-204-208; 181-209-208; 176-206-211 | 169-209; 179-208; 178-214 |
| Дипем-Я | 176-185; 179-181; 178-192; 186-195 | 181-189; 184-190; 175-187; 185-191 |

проводились после профилирования и ее ермической обработки на аттестованных контрольно-измерительных комплексах АО «ЗиО-Подольск».

Исходной заготовкой является холоднодеформированная труба 19x1,75 из стали марки 08X14МФ. Результаты измерений приведены в таблицах 5 и 6.

Полученные результаты показали, что структура и микротвердость рабочей поверхности теплообменных труб после профилирования и ее термической обработки всех производителей, в основном, мало отличаются друг от друга. Следовательно, выбор заготовки целесообразно производить исходя из экономической целесообразности и требований выполнения постановления Правительства РФ об импортозамещении отечественных товаров с учетом результатов проведения указанных выше испытаний.

В заключении отметим, что проведенные в рамках НИОКР комплексные изыскания теоретического и экспериментального характера показали, что применение указанных труб в конструкциях компактных сепараторов-пароперегревателей позволило преодолеть дефицит температуры греющего пара в 6°C и существенно снизить металлоемкость сепаратора-перегревателя СПП-1200.

Выводы

Рассмотрены технические решения и технологические методы повышения эффективности сепараторов-пароперегревателей в составе оборудования АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Даны сравнительные характеристики теплообменных поверхностей для кассет с трубами продольного и поперечного оребрения.

Изложены преимущества и недостатки применения теплообменных труб с шестью и 8 восьмью П-образными продольными ребрами в конструкциях теплообменных кассет СПП-1000 и СПП-1200.

Рассмотрено техническое решение, заключающееся в разработке и изготовлении кассетного блока с применением низкопрофильных монометаллических труб. Проанализированы некоторые проблемы, связанные с выбором заготовок теплообменных труб такого класса, фирм-изготовителей, а также технологий сборки и монтажа теплообменных кассет.

Целесообразность предлагаемых технических решений по модернизации СПП должна быть обоснована результатами теплогидравлических расчетов, а также сравнением технических характеристик конструкций до и после модернизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Егоров М.Ю., Готовский М.А., Федорович Е.Д. Повышение эффективности систем сепарации и перегрева пара в турбинах АЭС. *Надежность и безопасность энергетики*. 2011;3(14):57–64. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=oiqxdf&ysclid=mcvdbzv4x632112608> (дата обращения: 09.07.2025).
Egorov M.Yu., Gotovskiy M.A., Fedorovich E.D. Increasing the efficiency of steam separation and superheating systems in nuclear power plant turbines. *Safety and reliability of power industry*. 2011;3(14):52–64. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=oiqxdf&ysclid=mcvdbzv4x632112608> (accessed: 09.07.2025).
2. Мухачев В.Л., Пикус В.Ю., Назаров О.И. и др. Исследование работы сепаратора-пароперегревателя СПП-1000 на блоке № 1 Запорожской АЭС. *Теплоэнергетика*. 1991;4:43–46. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46559990&ysclid=mck5p7vnke437766966> (дата обращения: 09.07.2025).
Muhachev V.L., Pikus V.YU., Nazarov O.I. et al. Issledovanie raboty separatora-paroperegrevatel'ya SPP-1000 na bloke № 1 Zaporozhskoj AES. *Thermal engineering*. 1991;4:43–46. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46559990&ysclid=mck5p7vnke437766966> (accessed: 09.07.2025).
3. Трифонов Н.Н., Коваленко Е.В., Николаенкова Е.К., Тренькин В.Б. Разработка технических решений по обеспечению устойчивой работы системы промежуточной сепарации и перегрева пара для турбоустановки К-1000-60/3000. *Теплоэнергетика*. 2012;9:17–21. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=panjtn> (дата обращения: 09.07.2025).
Trifonov N.N., Kovalenko E.V., Nikolaenkova E.K., Tren'Kin V.B. Development of technical solutions for securing stable operation of the intermediate separation and steam reheating system for the K-1000-60/3000 turbine unit. *Thermal engineering*. 2012;59(9):661–666. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=panjtn> (accessed: 09.07.2025).
4. Легкоступова В.В., Судаков А.В. Модернизация сепараторов-пароперегревателей энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017;3(23):61–73. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30561962> (дата обращения: 09.07.2025).
Legkostupova V.V., Sudakov A.V. Modernization of separators-steam reheaters of nuclear power units with VVER reactors. *ST. Petersburg state polytechnic university journal of engineering science and technology*. 2017;3(23):61–73. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30561962> (accessed: 09.07.2025).
5. Кулаков Е.Н., Гаев В.Д., Казаров Г.И., Сухоруков Ю.Г., Попов А.В. Повышение эффективности использования тепла конденсата пароперегревателей турбоустановок новых и действующих АЭС. *Теплоэнергетика*. 2023;1:30–39. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50182955> (дата обращения: 09.07.2025).
Kulakov E.N., Gaev V.D., Kazarov G.I., Sukhorukov Yu.G., Popov A.V. More efficient heat recovery from the condensate of reheaters at new and operating nuclear power plants (NPPS). *Thermal engineering*. 2023;1:30–39. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50182955> (accessed: 09.07.2025).
6. Хижов М.Ю. Методика теплогидравлических испытаний продольно-оребрённых труб сепараторов – пароперегревателей для АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;2(31):59–66. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/ru/issues/2019-2-31?art=535> (дата обращения: 09.07.2025).
Khizhov M.Yu. Method of heat-hudraulic tests of long-relined pipes of separators – vapor heaters for NPP with water-water energy reactors. *Global nuclear safety*. 2019;2(31):59–66. (In Russ.). Available at: <http://gns.mephi.ru/ru/issues/2019-2-31?art=535> (accessed: 09.07.2025).
7. Смирнов А.М., Хижов М.Ю., Лексиков В.И. Оценка качества оребренных теплообменных труб сепаратора-пароперегревателя. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2018;4:135–141. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36533250&ysclid=mcvf23ly9z138166090> (дата обращения: 09.07.2025).
Smirnov A.M., Hizhov M.Yu., Leksikov V.I. Estimation of quality of heat exchange pipes with external ribs for the separator-superheater. *Engineering & automation problems*. 2018;4:135–141. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36533250&ysclid=mcvf23ly9z138166090> (accessed: 09.07.2025).
8. Terekhov V., Khizhov M., Mironova L. Quality assessment of pressed joints of heat-exchanger tube-tube sheets. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38:1348–1350. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.099>
9. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова и др.. Москва: Энергия, 1973. 299 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/nZxw1DRXovtW4?ysclid=mgymdkxcsd703029079> (дата обращения: 09.07.2025).
Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov (normativnyj metod). Pod red. N.V. Kuznecova et al. Moscow: Energiya, 1973. 299 p. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/nZxw1DRXovtW4?ysclid=mgymdkxcsd703029079> (accessed: 09.07.2025).
10. Судаков А.В., Легкоступова В.В. Сепараторы-пароперегреватели зарубежных фирм. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2015. 103 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25714324&ysclid=mcvftsonju370378339> (дата обращения: 09.07.2025).
Sudakov A.V., Legkostupova V.V. Separatory-paroperegrevateli zarubezhnyh firm. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2015. 103 p. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25714324&ysclid=mcvftsonju370378339> (accessed: 09.07.2025).

11. Судаков А.В., Силин В.В., Маринич А.М. и др. Сепаратор-пароперегреватель для перспективных блоков АЭС с ВВЭР. *Надежность и безопасность энергетики*. 2011;1(11);66–70. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16044069&ysclid=mcvg9pvo3y257792206> (дата обращения: 09.07.2025).

Sudakov A.V., Silin V.V., Marinich A.M. et al. Separator-steam superheater for prospective AES s VVER. *Safety and reliability of power industry*. 2011;1(11);66–70. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16044069&ysclid=mcvg9pvo3y257792206> (accessed: 09.07.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Терехов В.М. – разработка плана мероприятий по отработке технологии изготовления теплообменных кассет пароперегревателя с низкопрофильными монометаллическими трубами;

Миронова Л.И. – теоретическое обоснование выбора конструктивного исполнения труб продольного и поперечного оребрения по прочности труб в соединениях с натягом;

Хижов М.Ю. – анализ компоновки конструктивного исполнения сепараторов-пароперегревателей европейского и отечественного дизайнов (с горизонтальным и вертикальным расположением трубных пучков), разработка технического задания на проведение экспериментальных работ по исследованию эксплуатационных характеристик теплообменных труб различного вида оребрения, расчет и обработка экспериментальных данных.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Виктор Михайлович Терехов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергетическое машиностроение» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: v.terehov@eatom.ru

Любовь Ивановна Миронова – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Проектирование сложных технических систем» Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0927-4679>

e-mail: mironova_lub@mail.ru

Хижов Михаил Юрьевич – АО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Московская область, Российская Федерация.

e-mail: m.khizhov@eatom.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Terekhov V.M. – development of an action plan to test the technology of manufacturing heat exchange cassettes for a superheater with low-profile monometallic tubes;

Mironova L.I. – theoretical justification for the choice of the design of longitudinal and transverse finned tubes based on the strength of tubes in tension joints;

Khizhov M.Yu. – analysis of the design layout moisture separator-reheater of European and domestic designs (with horizontal and vertical arrangement of tube bundles), development of technical specifications for conducting experimental work to study the operational characteristics of heat exchange tubes with various types of finning, calculation and processing of experimental data.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Viktor M. Terekhov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Engineering Physics Institute «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: v.terehov@eatom.ru

Lyubov' I. Mironova – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Moscow Aviation Institute (State National Research University), Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0927-4679>

e-mail: mironova_lub@mail.ru

Mikhail Yu. Khizhov – JSC ECB «Gidropress», Podolsk, Moscow region, Russian Federation.

e-mail: m.khizhov@eatom.ru

Поступила в редакцию / Received 21.07.2025

После доработки / Revision 06.10.2025

Принята к публикации / Accepted 09.10.2025

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-2025-04-05>

УДК 621.039.516

EDN DWJEEE

Оригинальная статья / Original paper



Расчетное моделирование выгорающих поглотителей на основе бенчмарка уранового и смешанного уран-плутониевого топлива ВВЭР-1000

К.В. Кириллов, П.В. Ахметова, В.В. Семишин, Я.Д. Столотнюк  

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Российская Федерация

 stolotyard@bmstu.ru

Аннотация. Представлены результаты расчетного моделирования выгорающих поглотителей в составе ТВС с использованием инженерных программ САПФИР_95 и САПФИР_РФ. Разработаны две модели ТВС с урановым и уран-плутониевым топливом с применением уран-гадолиниевого выгорающего поглотителя, реализованного в виде твэга. Проведен анализ сеточной сходимости метода расчета коэффициента размножения нейтронов от глубины выгорания топлива. Выработаны рекомендации по количеству расчетных слоев в твэгах для недозамедленных систем (4÷8 слоев) и систем с жестким спектром (2÷4 слоя). Для оценки отклонения расчетов использовался бенчмарк VVER-1000 LEU and MOX. Расчеты, проведенные в программах САПФИР_95 и САПФИР_РФ, имеют результаты близкие, по отношению к данным, полученным в программах MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL. Максимальное значение относительного отклонения, отнесенного к среднему значению бенчмарка, при расчетах с использованием программы САПФИР_95 составило: для ТВС с урановым топливом 0,78 %, для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом 0,9 %. Для программы САПФИР_РФ значения отклонений равны 1,04 % и 1,41 % соответственно. Показано, что для недозамедленных систем с более жестким энергетическим спектром нейтронов, отсутствует явное снижение коэффициента размножения за счет применения СВП. Сделан вывод о возможном сокращении использования твэгов в сборках со смешанным уран-плутониевым топливом или отказе от них. В результате моделирования были получены зависимости распределения плотности потока нейтронов быстрой и тепловой групп в зависимости от глубины выгорания кассет. Результаты, полученные при расчете в САПФИР_95 и САПФИР_РФ, качественно не отличаются.

Ключевые слова: ТВС, выгорающие поглотители, коэффициент размножения, бенчмарк, САПФИР_95, САПФИР_РФ, отклонения расчета.


Для цитирования: Кириллов К.В., Ахметова П.В., Семишин В.В., Столотнюк Я.Д. Расчетное моделирование выгорающих поглотителей на основе бенчмарка уранового и смешанного уран-плутониевого топлива ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):48–57. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-05>

For citation: Kirillov K.V., Akhmetova P.V., Semishin V.V., Stolotnyuk Y.D. Calculational modeling of burnable absorbers based on the benchmark of uranium and mixed uranium-plutonium VVER-1000 fuel. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):48–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-05>

Calculational modeling of burnable absorbers based on the benchmark of uranium and mixed uranium-plutonium VVER-1000 fuel

Kirill V. Kirillov, Polina V. Akhmetova, Viktor V. Semishin, Yaroslava D. Stolotnyuk  

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russian Federation

 stolotyard@bmstu.ru

Abstract. The results of computational modeling of burnable absorbers in fuel assemblies using the SAPHIR_95 and SAPHIR_RF engineering programs are presented. Two models of fuel assemblies with uranium and uranium-plutonium fuel have been developed using a uranium-gadolinium burnable absorber implemented in the form of a fuel element. The analysis of the grid convergence of a method for calculating the neutron multiplication coefficient from the depth of fuel burnup is carried out. Recommendations have been developed on the number of calculated layers in fuel rods for non-slow systems (4-8 layers) and systems with a rigid spectrum (2-4 layers). The VVER-1000 LEU and MOX benchmark was used to estimate the calculation error. The calculations performed in the SAPHIR_95 and SAPHIR_RF programs have results similar to those obtained in the MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, and MULTICELL programs. The maximum value of the relative deviation of the benchmark value referred to the average value in calculations using the SAPHIR_95 program was: for fuel assemblies with uranium fuel 0.78%, for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel 0.9%. For the SAPHIR_RF program, the errors were 1.04% and 1.41%, respectively. It is shown that for systems with a rigid neutron spectrum, unlike non-slow systems, there is no obvious decrease in the multiplication coefficient due to the use of self-shielded burnable absorber. It is concluded that there may be a reduction in the use of fuel rods in assemblies with mixed uranium-plutonium fuel or their abandonment. As a result of the simulation, the distribution dependences of the neutron flux density of the fast and thermal groups were obtained depending on the depth of the burnout of the cassettes. The results obtained during the calculation in SAPHIR_95 and SAPHIR_RF are not qualitatively different.

Keywords: fuel assemblies, burnable absorbers, multiplication coefficient, benchmark, SAPHIR_95, SAPHIR_RF, calculation error.

Введение

Назначение выгорающих поглотителей (ВП) в ядерных реакторах заключается в подавлении избыточной реактивности топлива на начале его кампании, увеличении глубины выгорания топлива, уменьшении неравномерности энерговыделения по активной зоне и снижении требований к эффективности подвижных органов СУЗ и других компенсирующих систем [1]. ВП, как правило, постоянно находятся в рабочей области и извлекаются лишь во время перегрузок вместе с ТВС. Впервые в отечественной практике стержни выгорающего поглотителя (СВП) применялись на ВВЭР в виде трубок из циркониевого сплава Э110, заполненных сплавом МПА ($Al+CrB_2$) и герметизированных заглушками [2]. Время нахождения борного ВП в активной зоне ограничивалось 1 годом, по истечении которого СВП извлекался [2]. Необходимость дополнительных перегрузочных операций внутри ТВС в течении кампании топлива и ограниченность объема бассейнов выдержки осложняли применение СВП, в связи с чем бор в составе ВП был заменен на гадолиний Gd в форме оксида гадолиния Gd_2O_3 , интегрированного в материал топлива. То есть конструктивно стержень СВП подобен твэлу, поэтому СВП чаще называют тепловыделяющими элементами с добавлением гадолиния (твэгами). В связи

с высокой поглощательной способностью гадолиния данное решение позволило увеличить среднее обогащение урана по ТВС и создать новые поколения ТВС с удлиненной кампанией. Период активного выгорания твэга в топливной сборке также ограничивался 1 годом, но не требовал перегрузочных операций внутри ТВС по причине отсутствия (n, α)-реакции на ядрах изотопов гадолиния и распухания оболочек твэгов от накопления атомов гелия. Предыдущий состав СВП, содержащий бор, имеет ряд объявленных недостатков.

Учитывая актуальность использования ВП, выполнены работы, посвященные расчетно-теоретическому анализу применения различных ВП [3–7]. В работе [3] моделировались нейтронно-физические характеристики бенчмарка FullCore по программе САПФИР_95&RC_ВВЭР. Работы [4–7] посвящены исследованию выгорания твэгов в системах с разной жесткостью спектра с анализом их периода выгорания, процесса «просветления» для потоков быстрых и тепловых нейтронов в зависимости от глубины выгорания. Рассматривались вопросы оптимального выбора числа твэгов, способа профилирования и размещения их в ТВС. Расчетный анализ проводился с использованием программного кода Serpent.

Для обеспечения качества проектирования активных зон ядерных реакторов

необходимым этапом является выполнение поверочных расчетов в независимых программных комплексах, использующих различные методики и алгоритмы. В данной работе для проведения расчетов использовались САПФИР_95 и САПФИР_РФ. САПФИР_95 – это программа нейтронно-физического расчета инженерного класса, использующая аналитические методы решения для определения пространственно-энергетического распределения нейтронов в ячейке тепловых ядерных реакторов и получения малогрупповых нейтронных сечений и параметров стационарного отравления для диффузионных программ. Программа САПФИР_95 работает с библиотекой нейтронных констант БНАБ-78/С95. Программа САПФИР_РФ является модернизированной версией программы САПФИР_95. В САПФИР_РФ обновлена используемая библиотека нейтронных сечений на данных РОСФОНДА [8] и ENDF/B-VII [9].

Целью данной работы является исследование выгорания систем, содержащих выгорающие поглотители, с различным составом топлива (урановое и уран-плутониевое) и различной жесткостью спектра нейтронов с использованием программ САПФИР_95 и САПФИР_РФ. Реализованный в данных программах метод ВПС предполагает подготовку малогрупповых констант по областям элементов кассеты, которые определяются как регистрационные зоны. Малогрупповые константы определяются сверткой по выбранным регистрационным зонам и энергиям нейтронов. При этом количество регистрационных зон ВП является предметом выбора. Распределение нейтронного потока в объеме твэга и в прилегающей к нему области замедлителя характеризуется существенным градиентом, и необходимое количество регистрационных зон в этих областях определялось из условия минимизации отклонения расчетов.

Геометрические и материальные параметры рассматриваемых ТВС полностью соответствуют приведенным в бенчмарке VVER-1000 LEU and MOX, опубликованного в 2002 г [10].

Для оценки отклонения расчетов по программным комплексам САПФИР_95 и САПФИР_РФ использовался бенчмарк VVER-1000 LEU and MOX.

Спецификация бенчмарка VVER-1000 LEU and MOX

В бенчмарке описываются ТВС с урановым и смешанным уран-плутониевым топливом. Для обеих моделей геометрия сборки одинакова. Конструкция ТВС представляет собой шестигранную призму, заполненную твэлами (300 шт.), твэгами (12 шт.), 1 центральной трубой и направляющими каналами для поглощающих стержней СУЗ (18 шт.). Оболочки центральной трубы, направляющих каналов, твэгов и твэлов выполнены из сплава Э-110. Внутри центральной трубы и направляющих каналов находится теплоноситель. В модели сборки LEU (low-enriched uranium) в качестве материала топливного элемента используется диоксид урана UO_2 с обогащением по U^{235} 3,7 вес.%. В твэлах модели MOX (mixed oxide fuel) используется смешанное уран-плутониевое топливо из обедненного диоксида урана и диоксида плутония с обогащениями по делящемуся Pu 2.0, 3.0 и 4.2 вес.%. В бенчмарке расчет моделей ТВС проводится по 5 кодам: MCU¹ [11–12], TVS-M^{2,3}, WIMS8A⁴ [13], HELIOS³, MULTICELL [15,16]. Во время выгорания плотность объемного энерговыделения ТВС равнялась $q_v=108\text{МВт/м}^3$. В теплоносителе

¹ Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU. Учебное пособие. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. – 154 с. – Режим доступа: http://library.mephi.ru/pdf/tunnel.php?Z21FAMILY=максимова&Z21ID=62665&PATH=book-mephi%2FGurevich_Raschet_perenosa_neitronov_metodom_Monte-Karlo_2012.pdf (дата обращения: 28.05.2025).

² Курченко А.Ю., Большагин С.Н. Программа ТВС-М. Описание алгоритма и инструкция для пользователей. Отчет РНЦ КИ, инв. № 32/1-18-203 от 21.04.2003. – Москва, 2003.

³ Программа ТВС-М (версия 1.4). Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер ПС в ЦЭП № 611 от 31.07.2006. Регистрационный номер паспорта регистрации ПС № 239 от 23.09.2008. Федеральная служба РФ по экологическому, технологическому и атомному надзору. – Москва, 2008.

⁴ A modular scheme for neutronics calculations – ANSWERS Software Service WIMS. User guide for version 8: report ANSWERS/WIMS(99)9 – s.l., 1999.

поддерживалась постоянная концентрация борной кислоты 0,6 г/кг.

Подготовка расчетной модели ТВС для программ САПФИР_РФ и САПФИР_95

Разработаны две модели бесчехловых ТВС с урановым (рис. 1а) и смешанным уран-плутониевым топливом (рис. 1б) с применением уран-гадолиниевого ВП. С целью упрощения расчетов обе модели ограничены 60° сектором симметрии. На рисунке 1а зеленым цветом обозначено урановое топливо UO_2 с обогащением 3,7% по U^{235} . На рисунке 1б светло-зеленым, зеленым, темно-зеленым цветами обозначено уран-плутониевое топливо с обогащением по делящемуся Pu 2.0%, 3.0%, 4.2% соответственно. Другие цветовые обозначения на рисунке 1а и 1б идентичны: оранжевый – уран-гадолиниевый ВП с обогащением по U^{235} 3,6 вес.% и 4,0 вес.% по изотопам гадолиния, черный – оболочка из сплава Э-110, голубой – вода с концентрацией борной кислоты 0,6 г/кг.

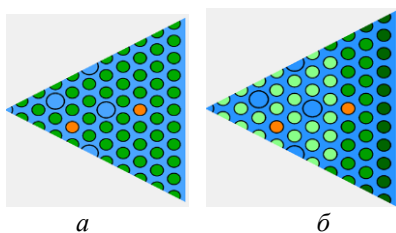


Рисунок 1. Модель ТВС ВВЭР-1000: а) с урановым топливом и уран-гадолиниевым СВП;

б) со смешанным уран-плутониевым топливом и уран-гадолиниевым СВП [составлено авторами]

Figure 1. VVER-1000 fuel assembly model: а) with uranium fuel and uranium-gadolinium SBA; б) with mixed uranium-plutonium fuel and uranium-gadolinium BA [compiled by the authors]

ТВС разбивались на множество регистрационных зон: в каждом ряду начиная от центра кассеты одинаковым типам материала присваивалась своя регистрационная зона, за исключением твэгов. Окружающая твэги вода для всех расчетов была разбита на 20 слоев с присвоением каждому из них своей регистрационной зоны. Для определения числа слоев, достаточного для достоверной картины выгорания, были рассмотрены несколько вариантов разбиения СВП на регистрационные зоны. Каждый твэг в кассете

разбивался последовательно на 1, 2, 4 и 8 регистрационных зон по условию равенства площадей. В каждом из слоев вычислялась плотность потока быстрых и тепловых нейтронов. К тепловой макрогруппе были отнесены нейтроны с энергиями до 0,625 эВ, а к быстрой – от 0,625 эВ до 10,5 МэВ.

Результаты моделирования и обсуждение Анализ $K_{inf}(V)$ в зависимости от глубины выгорания топлива

С целью подтверждения корректности сформированных моделей проводилось сопоставление расчетных зависимостей коэффициента размножения K_{inf} от глубины выгорания топлива V МВт·сут/кг с результатами бенчмарка. Сравнение результатов расчета исследуемой модели с отчетом бенчмарка представлено на рисунках 2 и 3 для кассеты со слабообогащенным ураном, 4 и 5 для кассеты со смешанным уран-плутониевым топливом [10].

В модели ТВС с урановым топливом величина отклонения результатов расчета $K_{inf}(V)$ от результатов бенчмарка зависит от выбранного количества регистрационных зон (слоев) (расхождение в результатах уменьшается с увеличением количества зон). Это расхождение наблюдается в течение 203 эфф. суток (период активного выгорания СВП) до глубины выгорания 8 МВт·сут/кг. Наибольшее расхождение результата расчета с бенчмарком имеется при значении глубины выгорания топливной сборки $V = 7$ МВт·сут/кг (рис. 2 и 3).

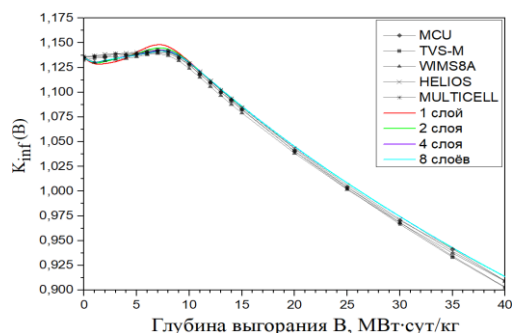


Рисунок 2. Результаты $K_{inf}(V)$ в зависимости от числа слоев разбиения твэгов для ТВС с урановым топливом и уран-гадолиниевым ВП по САПФИР_95 [составлено на основе ист. 10]

Figure 2. $K_{inf}(V)$ results depending on the number of fuel element separation layers for fuel assemblies with uranium fuel and uranium-gadolinium BA according to SAPHIR_95 [based on 10]

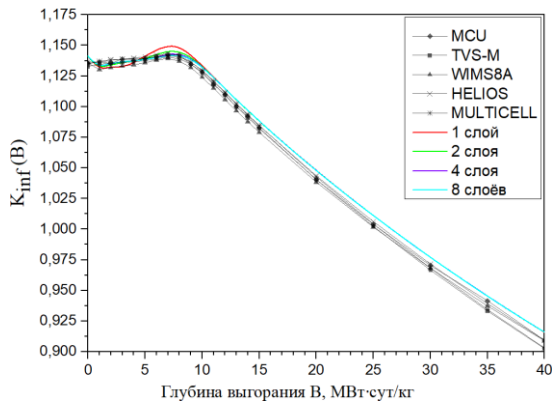


Рисунок 3. Результаты $K_{inf}(B)$ в зависимости от числа слоев разбиения твэгов для ТВС с урановым топливом и уран-гадолиниевым ВП по САПФИР_РФ [составлено на основе ист. 10]

Figure 3. $K_{inf}(B)$ results depending on the number of fuel element separation layers for fuel assemblies with uranium fuel and uranium-gadolinium BA according to SAPHIR_RF [based on 10]

Абсолютное отклонение расчета (ΔK_{inf}) (относительно модели с 8 слоями) коэффициента размножения в бесконечной среде для модели с 1 слоем в ПС САПФИР_95 составила 0,00679. Результаты расчета в ПС САПФИР_РФ показали большее значение абсолютного отклонения: $\Delta K_{inf} = 0,00749$. Относительные отклонения расчетов (абсолютные отклонения, отнесенные к значению K_{inf} для модели с 8 слоями) для моделей с 1, 2 и 4 слоями при значении выгорания топливной сборки $V = 7$ МВт·сут/кг представлены в таблице 1.

Таблица 1. Относительные отклонения определения K_{inf} ($B=7$ МВт·сут/кг) для ТВС с урановым топливом [составлено авторами]

Table 1. Relative errors in determining K_{inf} ($B=7$ MW·day/kg) for fuel assemblies with uranium fuel [compiled by the authors]

| Программа нейтронно-физического расчета | 1 слой | 2 слоя | 4 слоя |
|---|--------|--------|--------|
| ПС САПФИР_95 | 0,595% | 0,302% | 0,091% |
| ПС САПФИР_РФ | 0,656% | 0,294% | 0,082% |

Модель с разбиением твэга на 4 слоя дает относительную отклонение расчета 0,082÷0,091%, т.е. удовлетворяется критерий сеточной сходимости, значение которого принимается равным статистическому отклонению для прецизионной программы MCU, объявленной в бенчмарке 0,1 % [10].

В модели ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом активное выгорание

твэга осуществляется до глубины выгорания $V = 15$ МВт·сут/кг в течение 357 эфф. суток. Как видно на графиках рисунков 4 и 5, разбиение твэга на большое число слоев не повышает точность расчета выгорания, как это было в случае использования слабообогащенного уранового топлива.

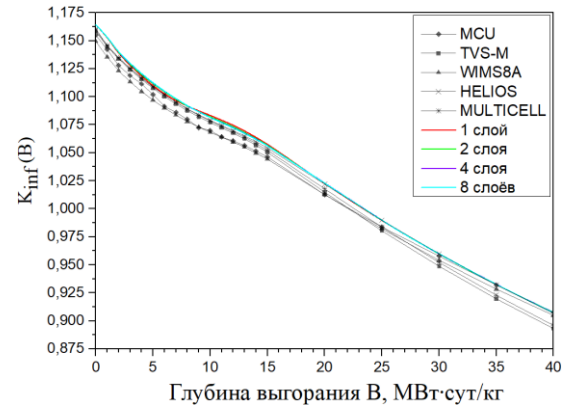


Рисунок 4. Результаты $K_{inf}(B)$ в зависимости от числа слоев разбиения твэгов для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом и уран-гадолиниевым ВП по САПФИР_95 [составлено на основе ист. 10]

Figure 4. $K_{inf}(B)$ results depending on the number of fuel element separation layers for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel and uranium-gadolinium BA according to SAPHIR_95 [based on 10]

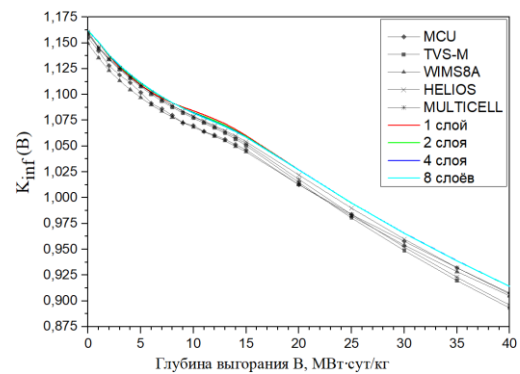


Рисунок 5. Результаты $K_{inf}(B)$ в зависимости от числа слоев разбиения твэгов для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом и уран-гадолиниевым ВП по САПФИР_РФ [составлено на основе ист. 10]

Figure 5. K_{inf} results(B) depending on the number of fuel element separation layers for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel and uranium-gadolinium BA according to SAPHIR_RF [based on 10]

Максимальные отклонения $K_{inf}(B)$ от отчета бенчмарка наблюдаются при глубинах выгорания 5 и 12 МВт·сут/кг. Относительные отклонения определения $K_{inf}(5)$ и $K_{inf}(12)$ представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 2. Относительные отклонения определения K_{inf} (5 МВт·сут/кг) для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом [составлено авторами]

Table 2. Relative errors in determining K_{inf} (5 MW-day/kg) for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel [compiled by the authors]

| Программа нейтронно-физического расчета | 1 слой | 2 слоя | 4 слоя |
|---|--------|--------|--------|
| ПС САПФИР_95 | 0,231% | 0,074% | 0,014% |
| ПС САПФИР_РФ | 0,222% | 0,065% | 0,010% |

Таблица 3. Относительные отклонения определения K_{inf} (12 МВт·сут/кг) для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом [составлено авторами]

Table 3. Relative errors in determining K_{inf} (12 MW-day/kg) for fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel [compiled by the authors]

| Программа нейтронно-физического расчета | 1 слой | 2 слоя | 4 слоя |
|---|--------|--------|--------|
| ПС САПФИР_95 | 0,227% | 0,094% | 0,030% |
| ПС САПФИР_РФ | 0,276% | 0,128% | 0,020% |

Из полученных результатов зависимости $K_{inf}(B)$ заметно отличие процесса выгорания топливной сборки относительно ТВС с урановым топливом. В ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом отсутствует явное снижение коэффициента размножения K_{inf} в начале кампании. По данным результатам можно заключить, что применение твэгов в топливной сборке с жестким спектром не позволяет обеспечивать эффективное использование ВП. Следовательно, возможно сократить использование твэгов в сборках со смешанным уран-плутониевым топливом или вовсе отказаться от них. Ряд авторов, которые так же анализировали применение ВП в системах с жестким спектром, приходят к тому же выводу [17,18].

Анализ распределения плотностей потока тепловых и быстрых нейтронов

Спектральный состав (по энергиям) плотности потока нейтронов является важным фактором для процесса выгорания ВП. Спектры нейтронов недозамедленных сред активных зон реактора ВВЭР (рассмотренные в данной работе) с урановым и уран-плутониевым топливом характеризуются различной жесткостью: $\Phi_6/\Phi_m=6,024$ и $\Phi_6/\Phi_m=11,765$ соответственно.

Расчетное моделирование распределения плотности потока нейтронов по энергетическим группам проводилось для

наиболее удаленного от центра кассеты твэга с разбиением его на 8 слоев.

Распределение плотностей потоков нейтронов по энергиям в урановом топливе на разных глубинах выгорания топлива представлено на рисунках 6 и 7. Нормировка потоков осуществлялась по среднему значению потока в макрогруппе по всему объему ТВС с целью нивелирования эффекта увеличения плотности потока нейтронов для поддержания прежней мощности топливной сборки, выражения (1):

$$\Phi_m^{norm}(B, r) = \frac{\Phi_m(B, r)}{\Phi_m(B)} : \Phi_6^{norm}(B, r) = \frac{\Phi_6(B, r)}{\Phi_6(B)}. \quad (1)$$

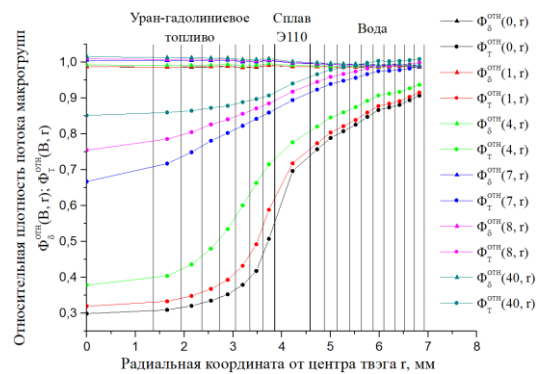


Рисунок 6. Распределение плотности потока нейтронов в быстрой и тепловой макрогруппах по радиусу твэга, оболочки и слоев жидкости в ТВС с урановым топливом (САПФИР_95) [составлено авторами]

Figure 6. Distribution of the neutron flux density in fast and thermal macrogroups along the radius of the fuel element, shell, and liquid layers in fuel assemblies with uranium fuel (SAPHIR_95) [compiled by the authors]

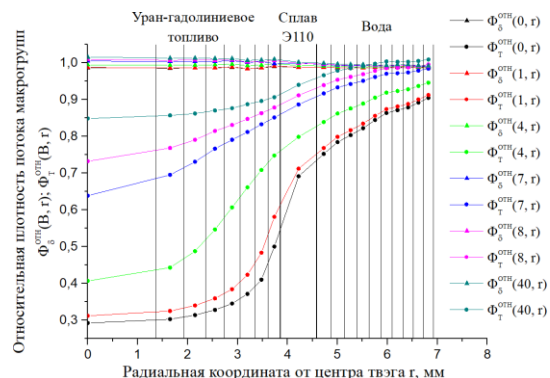


Рисунок 7. Распределение плотности потока нейтронов в быстрой и тепловой макрогруппах по радиусу твэга, оболочки и слоев жидкости в ТВС с урановым топливом (САПФИР_РФ) [составлено авторами]

Figure 7. Distribution of the neutron flux density in fast and thermal macrogroups along the radius of the fuel element, shell, and liquid layers in fuel assemblies with uranium fuel (SAPHIR_RF) [compiled by the authors]

Результаты, полученные при расчете в САПФИР_95 и САПФИР_РФ, качественно не отличаются. На нулевом и первом шаге выгорания заметен эффект самоэкранирования ВП для нейтронов тепловой области. По мере выгорания материала поглотителя происходит увеличение плотности потока тепловых нейтронов внутри твэга и в слоях замедлителя, примыкающих к нему. Видно незначительное изменение распределения плотности потока тепловых нейтронов между глубинами выгорания 8 МВт·сут/кг и 40 МВт·сут/кг, что говорит о неактивном прогорании ВП в этот период времени. Распределение потока быстрых нейтронов по материалу поглотителя постоянно и несколько снижено в области материала оболочки и водных слоев. С увеличением глубины выгорания эта разница увеличивается.

Распределение плотностей потоков нейтронов по энергиям в смешанном уран-плутониевом топливе на разных глубинах выгорания топлива приведено на рисунках 8 и 9. ПС САПФИР_95 и САПФИР_РФ качественно показывают идентичные картины выгорания твэга. На начальных шагах выгорания заметен эффект самоэкранирования ВП нейтронов тепловой макрогруппы. Степень самоэкранирования меньшая, чем в случае рассмотрения ТВС с урановым топливом, что связано с повышенной жесткостью спектра.

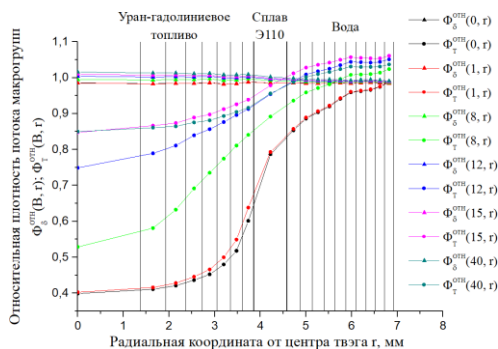


Рисунок 8. Распределение плотности потока нейтронов в быстрой и тепловой макрогруппах по радиусу твэга, оболочки и слоев жидкости в ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом (САПФИР_95) [составлено авторами]

Figure 8. Distribution of the neutron flux density in fast and thermal macrogroups along the radius of the fuel element, shell, and liquid layers in fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel (SAPHIR_95) [compiled by the authors]

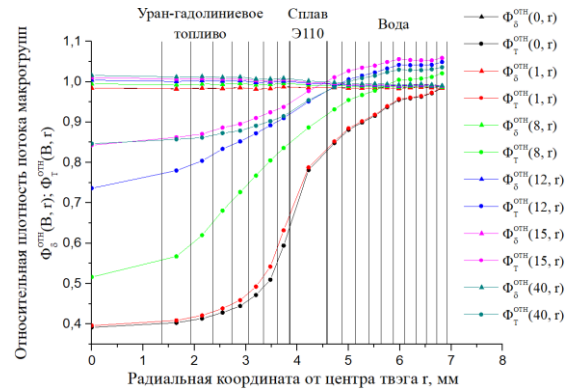


Рисунок 9. Распределение плотности потока нейтронов в быстрой и тепловой макрогруппах по радиусу твэга, оболочки и слоев жидкости в ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом (САПФИР_РФ) [составлено авторами]

Figure 9. Distribution of the neutron flux density in fast and thermal macrogroups along the radius of the fuel cell, shell, and liquid layers in fuel assemblies with mixed uranium-plutonium fuel (SAPHIR_RF) [compiled by the authors]

По мере выгорания твэга в материале ВП увеличивается плотность потока тепловых нейтронов. Также она растет в оболочке и прилегающих слоях теплоносителя, но с несколько меньшей интенсивностью. Изменения в распределении потока тепловых нейтронов после глубины выгорания в 15 МВт·сут/кг не наблюдается, что свидетельствует о завершении процесса активного выгорания ВП. Картина распределения плотности потока быстрых нейтронов аналогична распределению в случае ТВС с урановым топливом.

Заключение

Расчеты, проведенные в программах САПФИР_95 и САПФИР_РФ, имеют результаты близкие по отношению к данным, полученным в программах MCU, TVS-M, WIMS8A, HELIOS, MULTICELL. Относительно результатов расчетов бенчмарка, САПФИР_РФ по сравнению с САПФИР_95 точнее описывает зависимость $K_{inf}(B)$ на малых глубинах выгорания и несколько завышает значения на высоких глубинах выгорания топлива. Выявленное отличие при расчете выгорания вызвано использованием различных библиотек микроскопических сечений: БНАБ-78/С-95 для САПФИР-95 и РОСФОНД для САПФИР-РФ. То есть на

высоких глубинах выгорания САПФИР_95 моделирует зависимость $K_{inf}(B)$ ближе к значениям, известным из бенчмарка. Максимальное отклонение расчетов с использованием программы САПФИР_95 составило: для ТВС с урановым топливом 0,78 %, для ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом 0,9 %. Для программы САПФИР_РФ отклонения равны 1,04 % и 1,41 % соответственно.

Моделирования ТВС с урановым и смешанным уран-плутониевым топливом в программах нейтронно-физического расчета инженерного класса САПФИР_95 и САПФИР_РФ показали необходимость разбиения твэгов на регистрационные зоны. Рекомендуется при моделировании твэгов в недозамедленных системах с жесткостью спектра от 4 до 8, характерной для ТВС ре-

актора ВВЭР-1000, и размерами твэга более 1,5 от длины свободного пробега тепловых нейтронов, разбивать материал поглотителя на 4÷8 слоев. В системах с более жестким спектром при размерах твэга 1,2 от длины свободного пробега тепловых нейтронов рекомендуется разбивать твэг на 2÷4 слоя. При больших относительных размерах поглощающего материала рекомендуется разбиение твэга на 4 и более слоя.

В отличие от активной зоны с более жестким спектром нейтронов, в недозамедленной системе с урановым топливом применение СВП приводит к существенному снижению коэффициента размножения. В сборках со смешанным уран-плутониевым топливом можно снизить использование уран-гадолиниевых СВП или вовсе отказаться от них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Волков В.С., Лукьянов А.С., Чепкунов В.В., Шевяков В.П., Ямников В.С. Применение выгорающих поглотителей в ядерных реакторах. *Атомная энергия*. 1961;11(2):109–121. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t11-2_1961/p122/ (дата обращения: 29.07.2025).
Volkov V.S., Lukyanov A.S., Chepkunov V.V., Shevyakov V.P., Yamnikov V.S. The use of burnable absorbers in nuclear reactors. *Nuclear energy*. 1961;11(8):109–121. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t11-2_1961/p122/ (accessed: 29.07.2025).
2. Крюков В.В., Пономаренко В.Б. Органы регулирования реакторов ВВЭР. Машиностроение ядерной техники. Книга 1. Москва: Машиностроение, 2005. С. 505–509. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki_kn1_2005/p507/ (дата обращения: 28.05.2025).
Kryukov V.V., Ponomarenko V.B. Bodies regulirovaniya reactors LWR. *Mashinostroenie yadernoj tekhniki*. Book 1. Moscow: Mashinostroenie, 2005. P. 505–509. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/mashinostroenie-yadernoy-tehniki_kn1_2005/p507/ (accessed: 28.05.2025).
3. Антонов С.Н., Русанов А.Д., Устинов А.Н., Фатеев М.Ф. и др. Расчет нейтронно-физических характеристик бенчмарка FullCore по программам TDMCC и «САПФИР_95&RC_ВВЭР». *ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 2020;1:20–33. Режим доступа: https://vant.vniief.ru/publication/vant_math/2020/120/files/20-33.pdf (дата обращения: 29.07.2025).
Antonov S.N., Rusanov A.D., Ustinov A.N., Fateev M.F. et al. Calculation of the neutron-physical characteristics of the FullCore benchmark according to the TDMCC and SAPHIR_95&RC_VVER programs. *VANT, Ser. Mathematical Modeling of Physical Processes*. 2020;1:20–33. (In Russ.). Available at: https://vant.vniief.ru/publication/vant_math/2020/120/files/20-33.pdf (accessed: 29.07.2025).
4. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлинённых кампаниях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;(2):42–55. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>
Muzafarov A.R., Savander V.I. The use of burnable poisons in VVER-type reactors to reduce the fraction of the reactivity margin compensated by the liquid system during extended runs. *Global nuclear safety*. 2022;(2):42–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>
5. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей для снижения водообмена при жидкостном регулировании в реакторах типа ВВЭР. *Атомная энергия*. 2023;134(5-6):216–221. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5300/5288> (дата обращения: 29.07.2025).
Muzafarov A.R., Savander V.I. Use of burnable absorbers for reducing water exchange during the VVER liquid control. *Nuclear energy*. 2023;134:290–298. <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01057-z>
6. Внуков Р.А., Колесов В.В., Котов Я.А., Жаворонкова И.А. Исследование оптимального размещения выгорающего поглотителя в ТВС реактора ВВЭР-1200. Физика. Технологии. Инновации : тезисы докладов VIII

Международной молодежной научной конференции (Екатеринбург, 17–21 мая 2021 г.). Екатеринбург : УрФУ, 2021. С. 142–144. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/124270> (дата обращения: 29.07.2025).

Vnukov R.A., Kolesov V.V., Kotov Ya.A., Zhavoronkova I.A. Research of the optimal placement of a burnable absorber in fuel assemblies of a wwer-1200 reactor. *Physics. Technologies. Innovations. Abstracts of the VIII International Youth Scientific Conference* (Yekaterinburg, May 17–21, 2021). Yekaterinburg: Ural Federal University, 2021. P. 142–144. (In Russ.). Available at: https://vant.vniief.ru/publication/vant_math/2020/120/files/20-33.pdf (accessed: 29.07.2025).

7. Внуков Р.А., Жаворонков И.А., Колесов В.В., Карпович Г.В. Подходы к оптимизации глубины выгорания с помощью радиального профилирования ТВЭГа. *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2021;1(2110303):1–6. Режим доступа: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2021/1/2110303.pdf> (дата обращения: 29.07.2025).

Vnukov R.A., Zhavoronkov I.A., Kolesov V.V., Karpovich G.V. Approaches to optimizing the burnup depth using radial TVEG profiling *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo iniversiteta*. 2021;1(2110303):1–6. (In Russ.). Available at: <http://uzmu.phys.msu.ru/file/2021/1/2110303.pdf> (accessed: 29.07.2025).

8. Энциклопедия нейтронных данных РОСФОНД. Полный пакет обоснования отбора оценок. ФГУП ГНЦ РФ Физико-энергетический институт. Обнинск, 2006. Режим доступа: https://xn--80ahadac6cday6jf5b.xn--plai/data/links/Obosnovanie_ROSFOND.pdf (дата обращения: 29.07.2025).

ROSFOND Encyclopedia of Neutron Data. A complete package of justification for the selection of grades. FSUE SSC RF Institute of Physics and Energy. Obninsk, 2006. (In Russ.). Available at: https://xn--80ahadac6cday6jf5b.xn--plai/data/links/Obosnovanie_ROSFOND.pdf (accessed: 29.07.2025).

9. Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VI and ENDF/B-VII. Report BNL-NCS-44945-05-Rev. 2005. Available at: <https://www.nndc.bnl.gov/endl/b6.8/endl-102-endl6.8.pdf> (accessed: 29.07.2025).

10. NEA/NSC/DOC. A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. Nuclear Energy Agency, 2002. Available at: <https://oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/nsc-doc2002-10.pdf> (accessed: 29.07.2025).

11. Гомин Е.А., Гуревич М.И., Жирнов А.П., Калугин М.А. и др. Программа MCU-FCP для расчета переноса нейтронов методом вероятностей первых столкновений. *Атомная энергия*. 2008;105(2):67–72. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2416/2393> (дата обращения: 29.07.2025).

Gomin, E.A., Gurevich, M.I., Kalugin, M.A. et al. MCU-FCP program for first-collisions probability calculations of neutron transport. *Atomic Energy*. 2008;105:84–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-008-9069-y>

12. Гомин Е.А., Гуревич М.И., Майоров Л.В., Марин С. В. Описание применения и инструкция для пользователей программы MCU-RFFI расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов. Москва: РНЦ «Курчатовский институт», 1994. 63 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001700902?ysclid=mi7nf0grj3731484477> (дата обращения: 29.07.2025).

Gomin E.A. Description of the application and instructions for users of the MCU-RFFI program for calculating the neutron-physical characteristics of nuclear reactors by the Monte Carlo method. Moscow: NRC Kurchatov Institute, 1994. 63 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001700902?ysclid=mi7nf0grj3731484477> (accessed: 29.07.2025).

13. Третьякевич С.С., Сперанский Ф.А. Программные средства, применяемые для анализа и обоснования безопасности атомной электростанции в части нейтронно-физических вычислений. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2017;1(3):361–372. Режим доступа: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/article.php?IdArt=387> (дата обращения: 29.07.2025).

Tretyakevich S.S., Speransky F.A. Software tools used for analysis and justification of the safety of a nuclear power plant in terms of neutron physics calculations. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus*. 2017;1(3):361–372. (In Russ.). Available at: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/article.php?IdArt=387> (accessed: 29.07.2025).

14. Murphy B.D., Kravchenko J., Lazarenko A., Pavlovitchev A., Sidorenko V., Chetverikov A. Simulation of Low-Enriched Uranium (LEU) Burnup in Russian VVER Reactors with the HELIOS Code Package. ORNL/TM-1999/168. Available at: https://rsicc.ornl.gov/FMDP/TM1999_168.pdf (accessed: 29.07.2025).

15. Dastur A.R., Buss D.B. MULTICELL – a 3-D Program for the Simulation of Reactivity Devices in CANDU. AECL Report. AECL-7544. 1983 February. ISSN 0067-0367. Available at: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://inis.iaea.org/records/sz44e-9cw39/files/16042389.pdf&ved=2ahUKEwjy2fuP9peRAXX-IBAIHdJIBK8QFnoECCAQAQ&usq=AOvVaw08Yx2rO55mRhVtcUtkfVBU> (accessed: 29.07.2025).

16. Arsenault B., Chow H.C. Evaluation of Supercell Methodologies Using ZED-2 Measurements. 20th Annual Conference of the Canadian Nuclear Society Montreal, Quebec, Canada I May 30 – June 2, 1999. Available at: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://proceedings.cns-snc.ca/index.php/pcns/article/download/3372/3371/3407&ved=2ahUKEwicybOE_5eRAXU4TVUIHQ-wLzAQFnoECBwQAQ&usq=AOvVaw00rLSSawSjiWPCZFioExfk (accessed: 29.07.2025).

17. Семишин В.В. Оценка нейтронно-физических свойств активной зоны реактора ВВЭР-1000 при использовании регенерированного уран-плутониевого топлива. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2023;2:15–26. <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.02>

Semishin V.V. Evaluation of Neutronic Performance for the VVER 1000 Reactor Core with Regenerated Uranium Plutonium Fuel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023;2:15–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.02>

18. Бобров Е.А. Исследование характеристик замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР на основе РЕМИКС-технологии. Диссертация кандидата технических наук. Москва: НИЦ «Курчатовский институт», 2016. 129 стр. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-kharakteristik-zamykaniya-toplivnogo-tsikla-reaktorov-vver-na-osnove-remiks-tek> (дата обращения: 29.07.2025).

Bobrov E.A. Investigation of the characteristics of the fuel cycle closure of VVER reactors based on REMIX technology. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Moscow: SIC "Kurchatov Institute", 2016. 129 p. (In Russ.). Available at: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-kharakteristik-zamykaniya-toplivnogo-tsikla-reaktorov-vver-na-osnove-remiks-tek> (accessed: 29.07.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кириллов К.В. – проведение расчетов, визуализация, исследование;

Ахметова П.В. – обзор и редактирование, исследование;

Семишин В.В. – методология, программное обеспечение, редактирование;

Столотнюк Я.Д. – редактирование, исследование.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kirillov K.V. – calculations, visualization, investigation;

Akhmetova P.V. – review and editing, investigation;

Semishin V.V. – methodology, software, editing;

Stolotnyuk Ya.D. – review and editing, investigation.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

FUNDING:

No additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кирилл Вячеславович Кириллов, кафедра «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: kkirillov2002@mail.ru

Полина Вилевна Ахметова, кафедра «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: akhmetovapv@student.bmstu.ru

Виктор Вадимович Семишин, старший преподаватель кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: semishin@bmstu.ru

Ярослава Донатовна Столотнюк, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-1831-0228>

e-mail: stolotyad@bmstu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Kirill V. Kirillov, Department of nuclear reactors and installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.
e-mail: kkirillov2002@mail.ru

Polina V. Akhmetova, Department of nuclear reactors and installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.
e-mail: akhmetovapv@student.bmstu.ru

Viktor V. Semishin, Senior Lecturer, Department of nuclear reactors and installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.
e-mail: semishin@bmstu.ru

Yaroslava D. Stolotnyuk, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Department of nuclear reactors and installations, BMSTU, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-1831-0228>

e-mail: stolotyad@bmstu.ru

Поступила в редакцию / Received 18.08.2025

После доработки / Revision 05.11.2025

Принята к публикации / Accepted 11.11.2025

**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-2025-04-06>

УДК 621.791

EDN LIKVDK

Оригинальная статья / Original paper



**Анализ сварочного производства корпусных изделий
энергетического машиностроения**

М.Е. Жидков

*Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация
mezhidkov@yandex.ru*

Аннотация. Рассматривается специфика сварочного производства корпусного оборудования изделий энергетического машиностроения, отличающегося ярко выраженной дискретностью и характерными проблемами мелкосерийного производства, такими как низкая воспроизводимость технологических процессов и высокая степень неопределенности состояния компонентов. Затраты на подготовку производства сопоставимы или превышают затраты на непосредственное выполнение технологического процесса. В статье рассматриваются технологические свойства источников питания и сварочного автомата в единой системе «Источник питания – автомат – дуга – шов». При этом отдельно оцениваются технологические свойства в установившемся и динамическом режиме функционирования оборудования. В установившемся режиме технологические свойства как источников питания, так и сварочных автоматов, достаточно высоки и практически всегда удовлетворяют требованиям технологии сварки. Поэтому при оценке свойств оборудования чаще всего исследуют его способность обрабатывать технологические возмущения. По динамическим характеристикам элементов сварочного контура выполняется анализ переходных процессов. При этом у конвенциональных источников питания, содержащих электромеханические регуляторы динамические свойства определяются индуктивностью и конструктивными особенностями, а у полупроводниковых источников питания – характеристиками электронного блока управления. В работе сделан вывод о том, что успешное решение задачи проектирования системы управления сварочным контуром электродуговой сварки зависит от многих факторов и, в первую очередь, от информационной базы процесса для качественного формирования входного вектора состояния. По итогам работы сделан основной вывод о том, что создание современной системы управления невозможно без поддержки информационно – цифровыми аналитическими системами регистрации первичных массивов данных с последующим извлечением из них качественно новой информации о динамике процесса электродуговой сварки с целью обеспечения комплексного подхода к совершенствованию, охватывающего весь цикл сварочного производства.

Ключевые слова: энергетическое машиностроение, сварочное производство, мелкосерийное производство, контроль состояния процесса, система управления, цифровая информационно – аналитическая система, источник питания, технологическое возмущение, ручная дуговая сварка, сварка под флюсом.

Для цитирования: Жидков М.Е. Анализ сварочного производства корпусных изделий энергетического машиностроения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(5):58–63. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-06>

For citation: Zhidkov M.E. Welding production analysis of power engineering housing products. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):58–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-06>

Welding production analysis of power engineering housing products

Maxim E. Zhidkov

*«Atomash» the branch of «AEM-technology» JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
mezhidkov@yandex.ru*

Abstract. This article examines the specifics of welding the casework of power engineering equipment characterized by a pronounced discrete nature and inherent challenges of small-scale production such as low process reproducibility and a high degree of uncertainty in component condition. Pre-production costs are comparable to or exceed the costs of the

actual process. This article considers the process properties of power sources and welding machines in a single "power source – welding machine – arc – weld" system. The process properties are separately assessed in steady-state and dynamic modes of equipment operation. In steady-state mode, the process properties of both power sources and welding machines are quite high and almost always meet welding technology requirements. Therefore, when evaluating equipment properties, its ability to handle process disturbances is most often examined. A transient analysis is performed based on the dynamic characteristics of welding circuit elements. For conventional power sources containing electromechanical controllers, the dynamic properties are determined by inductance and design features, while for semiconductor power sources, they are determined by the characteristics of the electronic control unit. The paper concludes that successfully designing a control system for an electric arc welding circuit depends on many factors, primarily the process's information base for the high-quality generation of the input state vector. The main conclusion reached is that creating a modern control system is impossible without the support of information and digital analytical systems for recording primary data sets and subsequently extracting qualitatively new information about the dynamics of the electric arc welding process from them, ensuring a comprehensive approach to improvement encompassing the entire welding production cycle.

Keywords: power engineering, welding production, small-scale production, process control, control system, digital information and analytical system, power source, process disturbance, manual arc welding, submerged arc welding.

Сварочные производство корпусного оборудования изделий энергетического машиностроения отличается от общемашиностроительных производств явно выраженной дискретностью. Естественно, что загрузка сварочных участков по изготовлению одних и тех же узлов сравнительно не велика, следовательно, при организации сварочного производства возникают проблемы, характерные для мелкосерийного производства: воспроизводимость технологии, неопределенность состояния компонент технологического процесса [1].

В мелкосерийном производстве трудозатраты на его подготовку соизмеримы или превосходят трудозатраты, связанные непосредственно с реализацией технологического процесса, поэтому совершенствование мелкосерийного производства необходимо рассматривать в контексте требований всего производственного цикла, включающего как подготовку, так и реализацию технологического процесса. Теоретические концепции совершенствования подготовки мелкосерийного производства базируется на создание структурных подразделений, располагающих системными методами и средствами объективного количественного контроля состояния компонент производственного процесса [2,3]. Решение проблемы уменьшения влияния нестабильности связаны с организацией промышленных экспериментов и исследовании информационных потоков.

Существующая в настоящее время система проведения аттестационных процедур

проводимых путем установления соответствия фактических параметров компонент технологий с параметрами, приведенными в паспортах организаций-изготовителей имеет существенные недостатки связанные с высокой трудоемкостью и низкой эффективностью экспертных оценок.

Повышение производительности, эффективности и снижение себестоимости процесса подготовки сварочного производства может быть достигнуто за счет автоматизации аттестационных процедур и использования методов и средств системного анализа [4].

Реализация принципов промышленных исследований предопределяет разработку структуры инструментальных средств исследований и системы математического обеспечения. Ориентация современных цифровых средств контроля состояния технологического процесса в принципе совпадает с традиционными требованиями технологической подготовки, однако будучи реализованными на современных средствах вычислительной техники обеспечивают сокращение сроков и повышают достоверность результатов.

Проблемная ориентация средств контроля касается не только математического обеспечения, но и затрагивает аппаратную реализацию. Измерительные системы должны быть надежными и пригодными для использования в производственно-цеховых условиях. Интерфейс систем должен быть удобным и адаптированным представлению информа-

ции в соответствии с нормативной документацией.

Исследования сварочного оборудования, как составной части сварочного контура, позволяют проанализировать требования к нему. Комплекс требований, вытекающих из конкретных условий сварки, свойств свариваемых металлов, степени автоматизации приводится в соответствие с технологическими свойствами сварочного оборудования [5].

При автоматической сварке плавлением рассматриваются технологические свойства источников питания и сварочного автомата в единой системе «Источник питания – автомат – дуга – шов». При этом отдельно оцениваются технологические свойства в установившемся и динамическом режиме функционирования оборудования. В установившемся режиме технологические свойства как источников питания, так и сварочных автоматов, достаточно высоки и практически всегда удовлетворяют требованиям технологии сварки. Поэтому при оценке свойств оборудования чаще всего исследуют его способность обрабатывать технологические возмущения. К ним, прежде всего, относят: изменение нагрузки питающей сети, нагрузки на валах приводов, изменения проводимости дугового промежутка и другие факторы. Следует отметить, что привод электродной проволоки автомата и источник питания находятся в неодинаковых условиях по отношению к сварочному контуру. Источник питания является непосредственно связанным элементом сварочного контура по основным параметрам – току и напряжению.

Учитывая динамические характеристики элементов сварочного контура, можно провести анализ переходных процессов. Авторам работ [6,7] удалось сформулировать требования к источникам питания, содержащим простые параметрические регуляторы электромеханического типа. Динамические характеристики подобных источников питания определяются наличием индуктивности, а так как намоточные данные трансформаторов отличаются незначительно, и дроссели имеют параметры одного и того же порядка, динамические свойства про-

стейших источников питания практически не отличаются друг от друга и описываются апериодическим звеном первого порядка. Применительно к источникам питания, имеющим электронную систему управления такой подход неприемлем.

У источников питания, содержащих электромеханические регуляторы динамические свойства определяются индуктивностью и конструктивными особенностями, а у полупроводниковых источников питания – характеристиками электронного блока управления. Результаты исследований [8] подтверждают наличие разброса динамических характеристик у однотипных источников питания. Наиболее убедительным объяснением этому явлению следует считать факт зависимости характеристик электронных схем от настройки и изменение параметров полупроводниковых устройств от старения элемента. В тиристорных источниках питания отмечается различие характера переходных процессов. Естественно, что существенный разброс динамических свойств может отразиться на процессе сварки [8].

Учитывая вышеизложенное, можно отметить, что технологические свойства сварочного оборудования должны формулироваться не только как качественные показатели, но и должны содержать количественные характеристики, позволяющие отследить их изменение в процессе эксплуатации оборудования.

Характер протекания процессов в сварочном контуре при ручной дуговой сварке во многом зависит от используемых электродов. Свойства электродов для ручной дуговой сварки обычно связывают со стабильностью горения дуги, надежностью первоначального зажигания, стабильностью переноса электродного металла. Для оценки этих свойств введено более широкое понятие – технологические свойства электродов для ручной дуговой сварки. К ним принято относить следующие свойства покрытых электродов [5]: стабильность горения дуги, возможность сварки в различных пространственных положениях, производительность плавления электрода, надежность начального зажигания дуги, потеря металла на угар и разбрызгивание, хорошее формирование

валика, отделимость шлаковой корки, достаточная стойкость покрытия против механических повреждений. Под стабильностью дуги подразумевается способность сварочной дуги сохранять свои параметры при наличии возмущений: удлинений и обрывов дуги, коротких замыканий.

Под надежностью начального зажигания дуги понимается способность сварочной дуги возбуждаться при касании электродом изделия. Этот параметр определяет склонность электродов к образованию дефектов на начальных участках шва.

Разбрызгивание металла объясняется тем, что покрытие электрода не сбалансировано. Основными причинами разбрызгивания является:

- отклонение от оси электрода направления сил, отрывающих каплю расплавленного металла;
- взрывообразное выделение газов в объеме расплавленного металла;
- электрический взрыв перемычки между электродом и ванной.

Возможность реализации процесса сварки в различных пространственных положениях оценивается скоростями плавления основного и электродного металла. Существует так называемый тип «холодных» электродов, у которых используется тепловая мощность меньшая, чем мощность дуги у «горячих» электродов, предназначенных для сварки горизонтальных поверхностей.

Качество формирования валика определяется гладкой или мелкочешуйчатой поверхностью, без подрезов, наплавов и несплавлений.

Влияние технологических характеристик электродов на стабильность физико-химических процессов в сварочном контуре подробно изучено в работе [9]. Естественно, что это влияние распространяется и на электрический процесс в сварочном контуре, поэтому появляется перспектива решения обратной задачи – по оценкам стабильности протекания электрических процессов характеризовать технологические свойства сварочных материалов. Приведенный анализ в определенной степени распространяется и на другие способы сварки, в частности, на сварку под флюсом. Исходя из опыта сва-

рочного производства филиала ОАО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», процесс сварки под флюсом характеризуется большей стабильностью, и от объединения не поступало предложений по разработке методов оценки технологических свойств сварочного флюса.

Использование сварочного контура, как объекта управления рассмотрено в работах [7,10]. Суть наиболее интересных работ в этом направлении сводится к построению вектора состояния [11], характеризующего связь между показателями качества, управляемыми параметрами и технологическими возмущениями. Успешное решение такой задачи зависит от многих факторов.

Во-первых, создание системы управления требует хорошо развитой надежной информационной базы, позволяющей измерять значительное количество параметров.

Во-вторых, необходимы быстродействующие исполнительные устройства для компенсации технологических возмущений различной физической природы.

В-третьих, необходимо знать, как связаны показатели качества с параметрами процесса. Это требует разработки сложных математических моделей.

В-четвертых, нужны средства, позволяющие в реальном масштабе времени обрабатывать информацию от датчиков, проводить оценку состояния процесса и вырабатывать управляющие воздействия.

Наиболее распространенными дефектами сварных соединений изделий корпусного оборудования являются шлаковые включения. Опыт работы по разработке систем управления, отслеживающих причины появления таких дефектов на основе информации о сварочном токе и напряжении дал отрицательный результат. Обработка мгновенных значений тока и напряжения не позволяет идентифицировать момент образования дефектов типа шлаковых включений. Как показали проведенные исследования распределение значений тока и напряжения имеет нормальный закон. Такой характер распределения говорит о том, что в сварочном контуре действует большое количество возмущений равноценного значения. Поэтому выделить главную компоненту возмущения, приводящую к образованию дефекта не

представляется возможным. Построение системы управления для борьбы с дефектами такого типа требует разработки принципиально новых решений. Снижение уровня нестабильности компонентов технологического процесса (сварочного оборудования, сварочных материалов) и управления процессом сварки по сути является борьбой не со следствием причин, вызывающих отклонение технологических процессов от нормы, а попыткой ликвидации самих причин. Такой подход широко используется в современной технике и является перспективным. Схема локализации источника нестабильности применительно к сварочному производству энергетического оборудования АЭС представлена на рисунке 1.

Для технологической реализации влияния факторов нестабильности была использована процессорная информационно-измерительная система контроля параметров технологического процесса сварки.

Выводы:

– сварочное производство является открытой производственной системой с характерными признаками и проблемами мелкосерийного производства: низкая воспроизводимость технологии, неопределенность

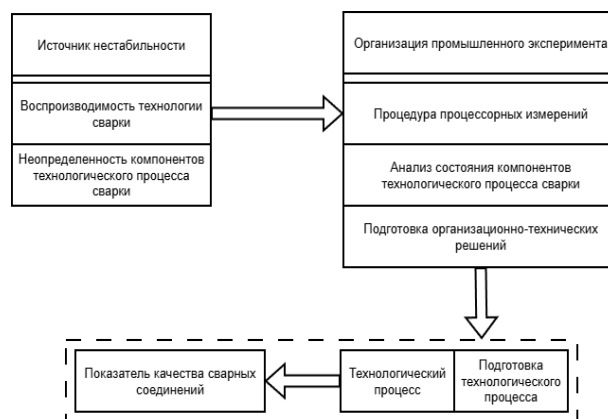


Рисунок 1. Схема локализации источников нестабильности в сварочном производстве
Figure 1. Diagram of localization of instability sources in welding production

состояния компонент технологического процесса;

– повышение эффективности современных систем управления качеством в сварочном производстве изделий ответственного назначения может быть обеспечено использованием информационно-аналитических систем предназначенных для сбора и обработки информации при подготовке и реализации технологического процесса сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Плескунин В., Фомин Б., Яковлев В, Крамер З., Штан Х, Воронина Е. Управление гибкими производственными системами: Модели и алгоритмы. Под общ. ред. С.В. Емельянова. Москва: Машиностроение, 1987. 368 с. Режим доступа: <https://bookmix.ru/book.phtml?id=2608939&ysclid=miifgi0pk9231811045> (дата обращения: 29.07.2025).

Pleskunin V., Fomin B., Yakovlev V., Kramer Z., Shtan H., Voronina E. Management of flexible manufacturing systems: Models and algorithms. Under the general editorship of S. V. Emelianov. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 368 p. (In Russ.). Available at: <https://bookmix.ru/book.phtml?id=2608939&ysclid=miifgi0pk9231811045> (accessed: 29.07.2025).

2. Грувер М., Зиммерс Э. САПР и автоматизация производства: Пер. с англ. Москва: Мир, 1987. 528 с. Режим доступа: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:130293/Source:default> (дата обращения: 29.07.2025).

Gruver M., Zimmers E. CAD and automation of production: Translated from English. Moscow: Mir, 1987. 528 p. (In Russ.). Available at: <https://elcat.bntu.by/index.php?url=/notices/index/IdNotice:130293/Source:default> (accessed: 29.07.2025).

3. Хартли Дж. ГПС в действии: Пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1987. 328с. Режим доступа: <https://knigogid.ru/books/1958869-gps-v-deystvii-fms-at-work-1984-proizvodstvennoe-izdanie?ysclid=miig1qki33995118172> (дата обращения: 29.07.2025).

Hartley J. GPS in action: Trans. from English. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 328 p. (In Russ.). Available at: <https://knigogid.ru/books/1958869-gps-v-deystvii-fms-at-work-1984-proizvodstvennoe-izdanie?ysclid=miig1qki33995118172> (accessed: 29.07.2025).

4. Чернов А.В. Обработка информации в системах контроля и управления сварочным. Новочеркасский гос. техн. ун-т. Новочеркасск. НГТУ. 1995. 178 с. ISBN 5-88998-004-1. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001729345?ysclid=mismcs29o3249016171> (дата обращения: 29.07.2025).

Chernov A.V. Information processing in monitoring and control systems for welding. Novocherkassk. state tech. univ. Novocherkassk: NSTU. 1995. 178 с. ISBN 5-88998-004-1. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001729345?ysclid=mismcs29o3249016171> (accessed: 29.07.2025)

5. Милютин В.С. Испытания сварочных свойств оборудования для дуговой сварки. Екатеринбург. 2019. 446 с. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/71955/1/milytin_2019.pdf?ysclid=miig9dqa1j630413850 (дата обращения: 29.07.2025).

Milyutin V.S. Testing the welding properties of arc welding equipment. Ekaterinburg. 2019. 446 p. (In Russ.). Available at: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/71955/1/milytin_2019.pdf?ysclid=miig9dqa1j630413850 (accessed: 29.07.2025).

6. Резницкий А.М., Коцюбинский В.С. Ремонт и наладка электросварочного оборудования. Москва: Машиностроение, 1991. 254 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001589583?ysclid=miigecn3c16072935> (дата обращения: 29.07.2025).

Reznitsky A.M., Kotsyubinsky V.S. Repair and adjustment of electric welding equipment. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 254 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001589583?ysclid=miigecn3c16072935> (accessed: 29.07.2025).

7. Розавсков Ю.Н. Оборудование для сварки плавлением. Москва: Энергоатомиздат, 1981. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001395204?ysclid=miight33bk521379804> (дата обращения: 29.07.2025).

Rozavskov Yu.N. Equipment for fusion welding. Moscow: Energoatomizdat, 1981. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001395204?ysclid=miight33bk521379804> (accessed: 29.07.2025).

8. Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А., Ильященко Д.П., Киселёв А.С., Гордынец А. С. Исследование стабильности плавления и переноса электродного металла в процессе дуговой сварки плавящимся электродом от источников питания с различными динамическими характеристиками. *Сварочное производство*. 2016;12:3–10. Режим доступа: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-svar/2016/12> (дата обращения: 29.07.2025).

Saraev Yu.N., Chinakhov D.A., Pyashchenko D.P., Kiselev A.S., Gordynets A.S. Study of the stability of melting and transfer of electrode metal in the process of arc welding with a consumable electrode from power sources with different dynamic characteristics. *Welding production*. 2016;12:3–10. (In Russ.). Available at: <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=PRSV-svar/2016/12> (accessed: 25.08.2025).

9. Гладков Э.А., Малолетков А.В. Управление технологическими параметрами сварочного оборудования для дуговой сварки: учебное пособие. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2007. 148с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/62060> (дата обращения: 25.08.2025).

Gladkov E. A., Maloletkov A.V. Control of technological parameters of welding equipment for arc welding: a tutorial. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2007. 148 p. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/62060> (accessed: 25.08.2025).

10. Алешин Н.П., Чернышов Г. Г., Гладков Э. А. и др. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т. Москва: Машиностроение, 2004. 624 с. Режим доступа: <https://lib-bkm.ru/12911?ysclid=misnur0dea606876979> (дата обращения: 29.07.2025).

Aleshin N.P., Chernyshov G.G., Gladkov E.A. and others. Welding. Cutting. Control: reference book: in 2 volumes. Moscow: Mechanical Engineering, 2004. 624 p. (In Russ.). Available at: <https://lib-bkm.ru/12911?ysclid=misnur0dea606876979> (accessed: 25.08.2025).

11. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов : Монография. Москва: Изд-во МГТУ, 2014. 487 с. Режим доступа: https://urss.ru/PDF/add_ru/193160-1.pdf?ysclid=misnztxyph970170291 (дата обращения: 25.08.2025).

Makarov E. L., Yakushin B.F. Theory of weldability of steels and alloys. Monograph. Moscow: Publishing house of Moscow State Technical University. 2014. 487 p. (In Russ.). Available at: https://urss.ru/PDF/add_ru/193160-1.pdf?ysclid=misnztxyph970170291 (accessed: 25.08.2025).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

FUNDING:

The author declare no external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

Жидков Максим Евгеньевич, директор, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
e-mail: mezhidkov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Maxim E. Zhidkov, Head of «Atomash» the branch of AEM-Technologies JSC, Volgodonsk, Rostov reg., Russian Federation.
e-mail: mezhidkov@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 22.09.2025

После доработки / Revision 04.12.2025

Принята к публикации / Accepted 09.12.2025

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>





УДК 621.036.56

EDN MWTZVK


Оригинальная статья / Original paper



Нейтронно-шумовой анализ вибрационного состояния тепловыделяющих сборок пятого поколения

Г.В. Аркадов¹  , М.Т. Слепов²  

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

² Филиал Акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация
 tymofeicht@yandex.ru

Аннотация. В представленной статье, авторами поднимаются вопросы вибрационного мониторинга тепловыделяющих сборок (ТВС) на основе анализа нейтронных шумов при обработке токовых сигналов датчиков прямого заряда (ДПЗ). Раскрыты принципы оценки вибрационного состояния ТВС по спектральным характеристикам. Сформулированы преимущества нейтронно-шумовых методов контроля, главными из которых является пассивность, использование штатного оборудования и возможность оценки вибросостояния ТВС в процессе работы блока на мощности. Кратко описаны отличия ТВС-5 от штатных ТВС для реакторных установок (РУ) ВВЭР-1200. Впервые произведен анализ нейтронных шумов тепловыделяющих сборок пятого поколения (ТВС-5) в составе седьмой топливной кампании на блоке 1 Нововоронежской АЭС-2 в низкочастотном и высокочастотных диапазонах. В низкочастотном диапазоне отмечено полное совпадение спектральных характеристик ТВС-5 и штатных ТВС. На основе экспериментальных данных делается важный вывод, что ТВС-5 по вибрационному состоянию не выделяются относительно штатных ТВС. Одновременно отмечено отличие регистрируемых экспериментально резонансов в спектральных характеристиках ТВС от набора частот, для которых проводилось теоретическое моделирование и расчет напряженно-деформированного состояния ТВС. В высокочастотном диапазоне, авторами отмечены различия между спектрами ТВС-5 и штатных ТВС. Авторами выделены частоты, которые являются общими для ТВС-5 и штатных ТВС, но есть и частоты, регистрируемые только для определенного типа ТВС. Учитывая, что оценка нейтронных шумов в высокочастотном диапазоне ранее не проводилась, делать выводы преждевременно, необходимо дальнейшее продолжение работы на действующих блоках АЭС.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка пятого поколения (ТВС-5), нейтронно-шумовой контроль, спектр, когерентность, ВВЭР-1200, датчик прямого заряда, вибрационное состояние, спектральные максимумы, собственные частоты, ТВЭЛ.


Для цитирования: Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовой анализ вибрационного состояния тепловыделяющих сборок пятого поколения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(5):64–77. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>

For citation: Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron noise analysis of the vibration state of fifth-generation fuel assemblies. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):64–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-07>

Neutron noise analysis of the vibration state of fifth-generation fuel assemblies

Gennady V. Arkadov¹  , Mikhail T. Slepov²  

¹ «Rise» non-profit partnership for system engineering development support, Moscow, Russian Federation

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
 tymofeicht@yandex.ru

Abstract. The article considers the issues of vibration monitoring of fuel assemblies based on the analysis of neutron noise during the processing of current signals from direct charge sensors. The principles of estimating the vibration state of fuel assemblies based on spectral characteristics are disclosed. The advantages of neutron noise control methods are formulated, the main of which are passivity, the use of standard equipment and the ability to assess the vibration state of the fuel assembly during operation of the unit at power. The differences between TVS-5 and standard fuel assemblies for VVER-1200 reactor installations are briefly described. For the first time, neutron noise analysis of fifth-generation fuel assemblies (TVS-5) as part of the seventh fuel campaign at unit 1 of Novovoronezh NPP-2 in the low-frequency and high-frequency ranges has been performed. In the low-frequency range, a complete coincidence of the spectral characteristics of the TVS-5 and the standard TVS was noted. Based on experimental data, an important conclusion is drawn that the fuel assemblies-5 do not stand out in terms of vibration relative to regular fuel assemblies. At the same time, a difference was noted between the experimentally recorded resonances in the fuel assembly spectral characteristics and the set of frequencies for which theoretical modelling and calculation of the stress-strain state of the fuel assembly were performed. The differences are noted between the TVS-5 and regular TVS spectra in the high-frequency range. The authors have identified frequencies that are common to TVS-5 and regular fuel assemblies, but there are also frequencies that are registered only for a certain type of fuel assemblies. Taking into account that neutron noise in the high-frequency range has not been assessed previously, it is too early to draw conclusions, and further work on existing nuclear power plant units is necessary.

Keywords: fifth generation fuel assembly (TVS-5), neutron noise control, spectrum, coherence, VVER-1200, direct charge sensor, vibration state, spectral maxima, natural frequencies, fuel elements.

Введение

Стратегия развития российской атомной отрасли направлена на создание двухкомпонентной ядерной энергетики, включающей реакторы на тепловых и быстрых нейтронах. Замыкание ядерного топливного цикла должно охватывать не только быстрые реакторы, работающие на уран-плутониевом МОКС- и СНУП-топливе [1,2], но и стандартные тепловые легководные реакторы. Начиная с 2021 г. на Балаковской АЭС проводится опытно-промышленная эксплуатация уран-плутониевого РЕМИКС-топлива [3] в реакторе ВВЭР-1000, что является важным шагом в этом направлении.

Для безопасности персонала промышленное производство уран-плутониевого топлива для ВВЭР должно быть полностью автоматизированным и безлюдным, как это реализовано при фабрикации ТВС для «быстрых» реакторов. Для этого в Росатоме разработана конструкция тепловыделяющей сборки пятого поколения для ВВЭР – ТВС-5.

Разработка новой конструкции ТВС-5 на основе ТВС-2М [4] обусловлена применением в будущем перспективного переработанного уран-плутониевого топлива. ТВС-5 сможет обеспечить минимизацию затрат персонала завода-изготовителя при выполнении производственных и контрольных операций с ТВС. Также новая конструкция ТВС должна исключать образование жидких

радиоактивных отходов при изготовлении ТВС путем исключения технологических операций лакопокраски/смазки твэлов и последующей отмычки собранной ТВС от лака/смазки. С учетом вышеизложенного, основным требованием, предъявляемым к конструкции ТВС-5 (в отличие от ТВС-2М), является требование по обеспечению возможности ее дистанционной сборки на заводе-изготовителе с минимальным обособленным уровнем наносимых при сборке дефектов оболочек твэлов без применения лаков и/или смазывающих составов. Реализация данных требований в новой конструкции ТВС обеспечит возможность ее дистанционной сборки, разборки и ремонта как на заводе-изготовителе, так и на АЭС с использованием стенда инспекции и ремонта ТВС. Разрабатываемая конструкция ТВС должна обладать высокой степенью унификации в рамках технологии ВВЭР – должна обеспечивать возможность ее использования с минимальными изменениями (учитывающими особенности конструкций оборудования различных типов реакторов ВВЭР) на всех современных типах реакторных установок (РУ) ВВЭР большой мощности – ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, а также ВВЭР-1300 (ВВЭР ТОИ).

Главным отличием ТВС-5 от сборок предыдущих поколений является отсутствие креплений тепловыделяющих элементов

в решетке нижнего узла ТВС для возможности обеспечения сборки высокофонового уран-плутониевого топлива на заводе-изготовителе и дистанционной замены дефектных ТВЭЛов при выполнении ремонта в условиях АЭС. Жесткий каркас, препятствующий искривлению кассеты в процессе эксплуатации образуется за счет приварки ДР к 18 направляющим каналам (НК). Вблизи нижней решетки расположена анти-вибрационная решетка, снижающая уровень вибронагрузок на элементы ТВС в зоне хвостовика.

Одним из этапов обоснования безопасной эксплуатации ТВС является оценка ее вибропрочности. С целью обоснования вибропрочности ТВС-5 необходимо провести расчеты ее динамических параметров, а также напряженно-деформированного состояния (НДС) ее конструктивных элементов при вынужденных колебаниях – вибрации, вызываемой за счет пульсации давления теплоносителя, колебаний опорных конструкций, работой насосного оборудования. Для достоверной оценки вибрационных нагрузок на ТВС необходимо определить амплитуду и частоту вибрации. Коварство вибрационных процессов проявляется в том, что при относительно малых амплитудах колебаний данным процессом при расчете ресурса оборудования можно пренебречь, но в случае совпадения одной или нескольких частот (резонансные явления) указанное воздействие может иметь основополагающую роль. Конечно, любое резонансное явление считается недопустимым, и на уровне проектирования стремятся полностью исключить возможного совпадения частот различных колебательных процессов, однако не всегда удается этого избежать. К сожалению, вопросам вибрационного мониторинга ТВС во время эксплуатации уделяется крайне незначительное внимание, т.к. ошибочно предполагается отсутствие методов и методик, позволяющих проводить контроль во время работы энергоблоков.

Авторы в своих работах [5–10] убедительно доказывают, что анализ нейтронного шума датчиков прямого заряда (ДПЗ) позволяет с достаточной степенью точностью установить частотный состав вибрации ТВС

различного типа. При получении дополнительных данных от разработчика реакторной установки ВВЭР-1200 АО ОКБ «Гидропресс», возможна оценка амплитуд колебаний ТВС по нейтронным шумам.

Исходя из сказанного выше становится понятным, почему оценка вибрационных нагрузок на ТВС в активной зоне ВВЭР-1200 производится на основе данных, характерных для реакторов ВВЭР-1000¹. В отчете¹ постулируется, что в спектре вибрационных нагрузок присутствуют возбуждающие воздействия с частотами 5,0; 10,0; 16,5 и 33,0 Гц, при этом амплитуда виброускорений элементов активных зон не превышает 0,5 м/с². Для указанных значений частот вибрационных нагрузок проводится анализ НДС элементов ТВС-5: оболочках ТВЭЛов, ДР, нижней решетки. Задача оценки вибропрочности элементов ТВС проводится в несколько этапов: расчет спектра собственных частот и форм колебаний ТВС в целом, проверка условий отстройки полученных частот от вызывающих вибрации нагрузок для исключения резонансных явлений, моделирование динамики ТВС методом модальной суперпозиции в условиях вибронагружения, расчет компонентов НДС с учетом полученных амплитуд колебаний.

Несмотря на безусловную фундаментальность и безупречность исполнения научно-исследовательской работы, отраженной в отчете Нововоронежской АЭС¹ (далее – НВАЭС), авторы считают своим долгом напомнить, что никакой расчетный метод или программный код не может учесть все особенности конструкции каждого конкретного энергоблока и специфику различных процессов, делающих уникальной каждую РУ, а только прямые измерения позволяют определить все тонкости работы конструкций и устройств. В представленной статье впервые приводятся экспериментальные

¹ Отчет о научно-исследовательской работе. Разработка и обоснование безопасности применения ядерного топлива для реакторных установок АЭС-2006: обоснование безопасности проведения реакторных испытаний опытной партии ТВС-5 с урановым топливом на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 в 7-9 топливных загрузках. – Москва, НИЦ Курчатовский институт, 2024. – 97 с. – Режим доступа: по запросу.

данные по частотному составу вибрации двух ТВС-5, эксплуатирующихся на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2 в составе 7-топливной компании.

Краткие сведения об испытаниях ТВС-5 на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2

В рамках Программы первоочередных работ на 2020–2021 гг. по переходу на «Сбалансированный ЯТЦ», утвержденной Первым заместителем гендиректора по операционному управлению Госкорпорации «Росатом» А.М. Локшиным, АО ОКБ «Гидропресс» в сотрудничестве с ПАО «НЗХК» провели комплекс расчетно-экспериментальных НИОКР. В результате этих исследований была разработана конструкция ТВС-5, для которой экспериментально подтверждена возможность дистанционной сборки пучка ТВЭЛОВ.

На следующем этапе планировалось провести испытания конструкции ТВС-5 в действующем реакторе. Согласно п. 2 «Решения №В545-ТП-007-О об организации работ по изготовлению и реакторным испытаниям опытной партии из трех ТВС-5 с урановым топливом на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2 начиная с шестой топливной загрузки» предполагалось начать эксплуатацию сборок ТВС-5 с урановым топливом с шестой топливной загрузки. Проведенные расчеты показали, что опытная эксплуатация трех ТВС-5 в загрузках шесть-восемь незначительно влияет на проектные нейтронно-физические характеристики. Однако начало испытаний было перенесено. В связи с этим было принято новое решение об организации работ по реакторным испытаниям опытной партии из трех ТВС-5 с урановым топливом на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2, начиная с седьмой топливной загрузки.

Для выполнения программы испытаний в седьмую топливную загрузку в активную зону устанавливаются 72 ТВС:

- 12 ТВС типа Z49B6;
- 24 ТВС типа Z49Y7;
- 24 ТВС типа Z44Y7;
- 9 ТВС типа Z49Y9.
- 3 ТВС типа Y49Y9 (ТВС-5).

Среднее обогащение топлива подпитки составляет 4,69 % вес.

Расположение ТВС-5 в активной зоне седьмой топливной загрузки представлено на рисунке 1 (ТВС-5 выделены красным цветом), а краткие сведения сведены в таблице 1. Из представленных данных следует, что под постоянным контролем находятся только 2 сборки (07-18 и 03-36) из 3 возможных. Сборка установленное в ячейку №13 (координаты 14-33) не оснащена измерительными каналами ДПЗ. Поэтому дальнейший анализ вибрационного состояния ТВС-5 по нейтронно-шумовым сигналам будет произведен только для двух ТВС-5, оснащенных каналами ДПЗ. Общий вид сборки ТВС-5 представлен на рисунке 2 (взяты из Отчета о научно-исследовательской работе; см. сноску 1).

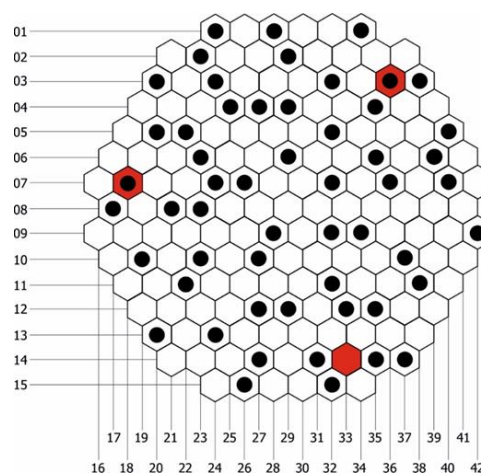


Рисунок 1. Картограмма седьмой топливной загрузки блока №1 НВАЭС-2, ТВС-5 выделены красным цветом. ТВС со сборками ДПЗ отмечены черным кругом

Figure 1. Cartogram of the seventh fuel loading unit No.1 NVNPP-2, fifth generation fuel assembly are highlighted in red. Fuel assemblies with direct charge sensors assemblies are marked with a black circle

Таблица 1. Краткие сведения о ТВС-5 в составе седьмой топливной загрузки блока №1 НВАЭС-2

Table 1. Brief information about TVS-5 as part of the seventh fuel load of Unit No. 1 of the Novovoronezh Nuclear Power Plant-2

| № п/п | Координаты | Ячейка | Заводской номер | Оснащение ДПЗ |
|-------|------------|--------|-----------------|---------------|
| 1 | 07-18 | 90 | 4929 20401 | + |
| 2 | 14-33 | 13 | 4929 20402 | - |
| 3 | 03-36 | 147 | 4929 20403 | + |

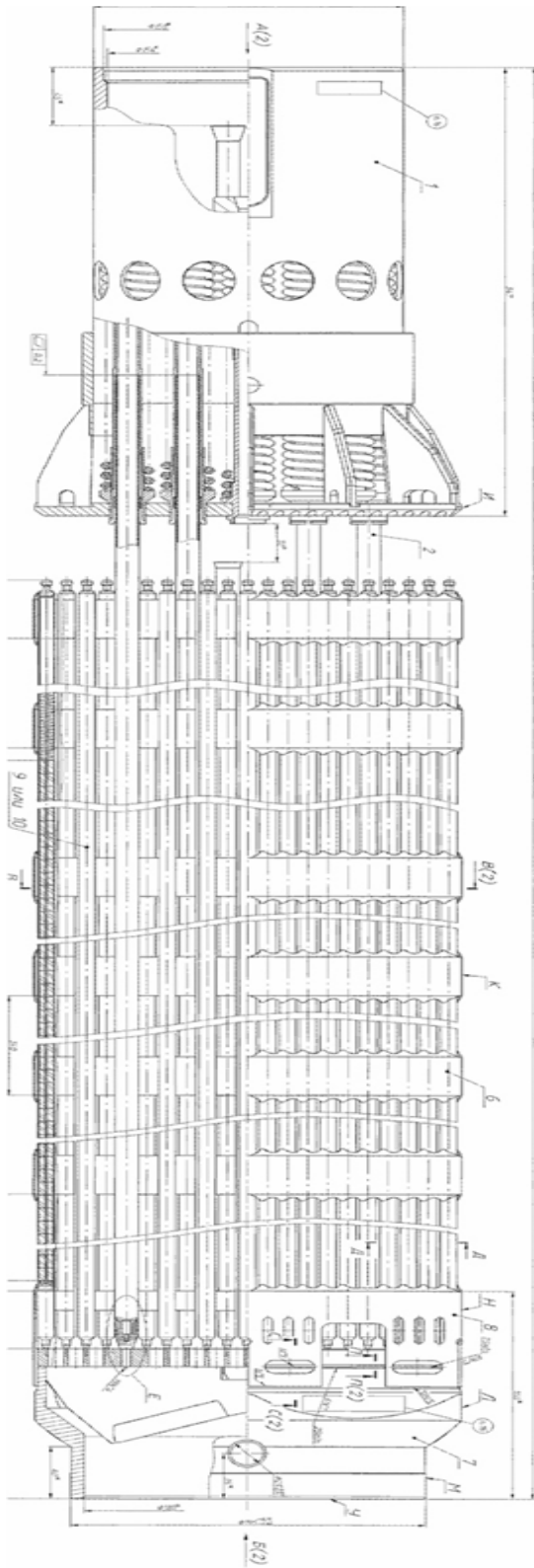


Рисунок 2. Общий вид ТВС пятого поколения (ТВС-5)^{см.сн.1}

Figure 2. General view of the fifth-generation fuel assemblies (TVS-5)^{Note 1}

Для регистрации нейтронно-шумовых сигналов, а также сигналов виброускорения реализовано стандартное для НВАЭС реше-

ние, представляющее собой интеграцию измерительных каналов различного типа стационарных систем диагностики в единый измерительный кластер с использованием мобильных сборщиков данных прецизионного класса. Указанная возможность интеграции была впервые опробована при пуске энергоблока №1 НВАЭС-2 (подробнее см. в работе авторов [11]) и широко используется в настоящее время в виде штатной измерительной процедуры [10].

В качестве источника данных для нейтронно-шумового анализа используются сигналы ДПЗ системы внутриреакторного контроля (СВРК) (подробнее источник [15]). Из конструктивных особенностей возможно подключение только двух сборок ДПЗ к измерительному кластеру, что позволяет проводить одновременный анализ только 14 нейтронно-шумовых сигналов (2 x 7), 12 акселерометров (4 на верхнем блоке реактора + 8 на петлях) и 3 ионизационных камер.

В настоящей статье будут подробно анализироваться сигналы только ДПЗ, размещенных как в ТВС-5, так в и штатных ТВС во время эксплуатации блока на мощности (сведения об используемых в экспериментах парах ТВС сведены в табл. 2). Для анализа вибрационного были подобраны соответствующие пары для каждой ТВС-5, учитывая особенности размещения в АЗ нового топлива, а также вид и год эксплуатации. К сожалению, учитывая технические ограничения (возможность использования только 14 нейтронно-шумовых каналов) и расположение ТВС-5 в седьмой топливной загрузке, выбор пар не является оптимальным. Для анализа использовались временные реализации длительностью 30 мин., частота дискретизации 1024 Гц.

Таблица 2. Краткие сведения об используемых в экспериментах парах ТВС

Table 2. Brief information about the fuel assemblies used in the experiments

| № п/п | Координаты | Вид топлива | Год работы | Координаты | Вид топлива | Год работы |
|-------|------------|-------------|------------|------------|-------------|------------|
| 1 | 03-36 | Y49Y9 | 1 | 20-29 | Z49Y9 | 2 |
| 2 | 03-36 | Y49Y9 | 1 | 04-35 | Z49B6 | 2 |
| 3 | 07-18 | Y49Y9 | 1 | 20-29 | Z49Y9 | 2 |
| 4 | 07-18 | Y49Y9 | 1 | 08-21 | Z49Y7 | 2 |

Низкочастотный диапазон

Долгое время, в научной среде существовало ошибочное мнение о невозможности получения достоверных данных из нейтронно-шумовых сигналов для частот свыше 50 Гц. Объяснялось данное заблуждение, с одной стороны, низкой скоростью работы аналого-цифровых преобразователей (АЦП), с другой, большой инертностью используемых ДПЗ и ионизационных камер (ИК), работающих на активационном принципе. В действительности при использовании соответствующих технических средств и авторской методологии многоканальных синхронизированных измерений (подробнее источники [10,11]) исследуемую частотную полосу можно существенно расширить вплоть до предельной частоты в 512 Гц. Однако в данной работе предлагается исследовать два диапазона: низкочастотный от 0 Гц до 50 Гц (условно) и высокочастотный от 50 Гц до 200 Гц (условно). Низкочастотный диапазон нейтронных шумов достаточно хорошо изучен и описан в специальной литературе.

Начиная с РУ ВВЭР-440 (подробнее в источнике [12]), через РУ ВВЭР-1000 ([13]), и заканчивая референтными блоками с РУ ВВЭР-1200 ([9]) проводились систематические нейтронно-шумовые измерения в низкочастотном диапазоне, накапливались базы данных, проводилась систематизация и оценка полученных материалов. Поэтому отсутствие в отчете (см. сноску 1) некоторых частот вибрации ТВС, полученных экспериментально и подробно описанных в соответствующих источниках [13,14], вызывает некоторое недоумение у авторов.

Разберем более подробно частотный состав вибрационного состояния как ТВС-5, так и штатных ТВС. На рисунке 3 представлены автоспектральные плотности мощности всех ДПЗ, задействованных в эксперименте для пар 03-36 и 02-29, 03-36 и 04-35, 07-18 и 02-29, 07-18 и 08-21, измеренных практически сразу после выхода энергоблока №1 НВАЭС-2 на номинальный уровень мощности. При сравнении спектров ТВС-5 и стандартных ТВС заметных отличий не выявлено, что позволяет сделать первый вывод о том, что вибрационное состояние

ТВС-5 как минимум соответствует вибрационному состоянию штатных ТВС. Незначительные отличия связаны со спецификой работы каждой ТВС. К сожалению, в качестве измерительных каналов задействованы сборки внутриреакторных детекторов (СВРД) второго года эксплуатации, поэтому часть ДПЗ неисправно, что заметно на представленных графиках. Для детального анализа вибрационного состояния ТВС рассмотрим более подробно в качестве примера спектральные оценки для пары 03-36 и 02-29.

На рисунке 4 представлены спектральные оценки для ТВС с координатами 03-36 (рис. 4а) и 02-29 (рис. 4б) и полный перебор функций когерентности² для всевозможных пар ДПЗ в пределах одной ТВС, (соответственно рис. 4б и рис.4г). Для адекватного воспроизведения информации убраны спектры неисправных ДПЗ. Необходимо выделить следующие частоты (интерпретация ниже):

– $f(\text{ТВС}_{1И}) = 6,1 \text{ Гц}$ – изгибная частота ТВС;

– $f(\text{АСВ}_{1К}) = 8,7 \text{ Гц}$ – частота первой корпусной акустической стоячей волны (АСВ);

– $f(\text{ТВС}_{2И}) = 12,3 \text{ Гц}$ – вторая гармоника изгибной частоты ТВС;

– $f(\text{ГЦНА}_{1обр}) = 16,6 \text{ Гц}$ – оборотная частота вращения главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА);

– $f(\text{ГЦНА}_{2обр}) = 33,2 \text{ Гц}$ – вторая гармоника оборотной частоты вращения ГЦНА.

Из приведенного перечня реально зарегистрированных в эксперименте частот, списочному составу, представленному в отчете (см. сноску 1): 5,0 Гц; 10,0 Гц; 16,5 Гц и 33,0 Гц, соответствуют только две частоты: 16,5-16,6 Гц и 33,0-33,2 Гц.

Частота 6,1 Гц (обозначение – $f(\text{ТВС}_{1И})$) впервые была зарегистрирована во время проведения нейтронно-шумовых измерений на РУ ВВЭР-1200 и только в спектрах ДПЗ позиции 1 (источники [8,9]). В спектральных оценках ДПЗ РУ с ВВЭР-1000 указанная ча-

² Расчет функции когерентности и ее значение при спектральном анализе изложены в источниках [5,10,13].

стота отсутствовала, что позволило сделать вывод об особенностях вибрационного состояния ТВС РУ с ВВЭР-1200. Следует подчеркнуть, что все измерения, где частота 6,1 Гц регистрировалась в спектрах, ДПЗ проводились по авторской методологии [10],

которая позволяет выявлять «тонкую» структуру нейтронных шумов. В случае использования штатных систем диагностики, например, системы контроля вибрации (СКВ), частота 6,1 Гц не выявляется.

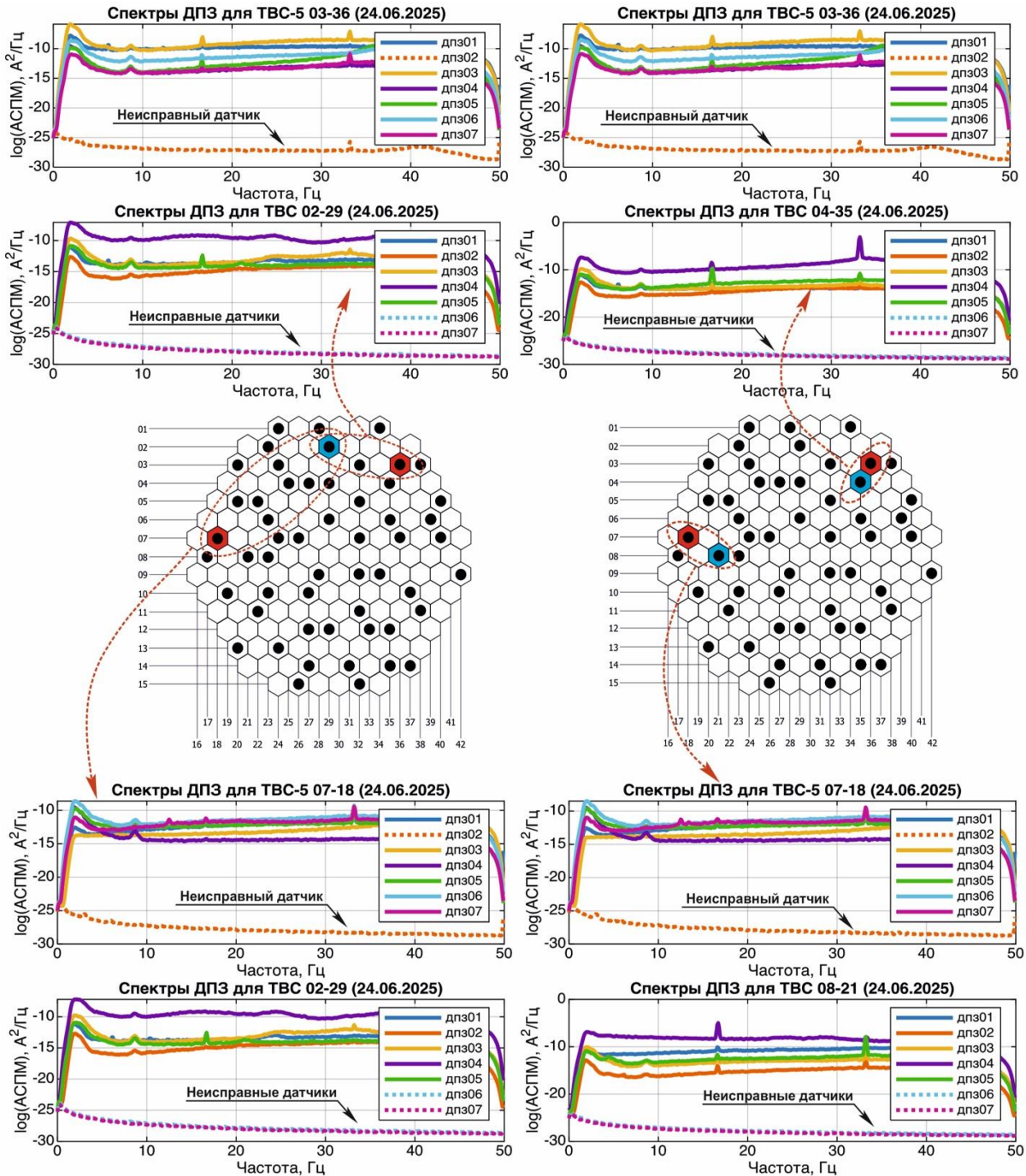


Рисунок 3. Автоспектральные плотности мощности сигналов ДПЗ, задействованных в эксперименте
 Figure 3. Autospectral power densities of the direct charge sensors signals involved in the experiment

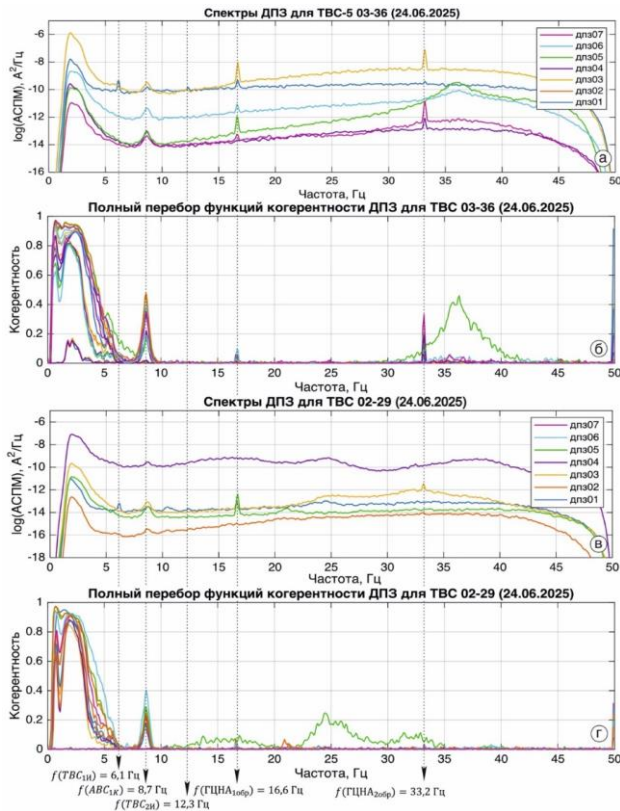


Рисунок 4. Автоспектральные плотности мощности сигналов ДПЗ, задействованных в эксперименте для ТВС 03-36 (а) и ТВС 02-29 (в) в диапазоне от 0 Гц до 50 Гц. Соответствующие функции когерентности для ТВС 03-36 (б) и ТВС 02-29 (г)

Figure 4. Autospectral power densities of the direct charge sensors signals involved in the experiment for fuel assembly 03-36 (a) and fuel assembly 02-29 (в) in the range from 0 Hz to 50 Hz. The corresponding coherence functions for fuel assembly 03-36 (б) and fuel assembly 02-29 (г)

Благодаря выводам, представленным в Пояснительной записке³, можно утверждать, что частота 6,1 Гц соответствует первой изгибной частоте вибрации ТВС. Более того, в работе Ю.Г. Драгунова и соавторов [16] так представлены результаты экспериментальной работы по изучению влияния степени поджатия ТВС на частоту собственных колебаний. Из полученных данных следует важный вывод о том, что ТВС совершает колебания на своей частоте только в случае регламентного поджатия, при ослаблении частота сдвигается в низкочастотную область. За все время наблюдений

за вибрационным состоянием ТВС РУ с ВВЭР-1200, авторам не удалось обнаружить сдвига частоты 6,1 Гц в низкочастотную область ни у одной контролируемой ТВС. Частота 6,1 Гц регистрируется абсолютно у всех ТВС не зависимо от года эксплуатации и места расположения в АЗ с точностью до 0,01 Гц⁴, что говорит о надежном поджатии топлива в РУ с ВВЭР-1200. Вопрос о том, почему указанный резонанс регистрируется только одним ДПЗ на позиции 1 – открытый. Авторы, пока предполагают, что на остальных уровнях фоновые значения нейтронного шума превышают слабые колебания нейтронного поля вызванные вибрацией ТВС, поэтому описываемый эффект не проявляется. Однако, на горизонтах 4 и 5 часто регистрируется частота 12,3 Гц (источник [10] – вторая гармоника $f(TBC_{1И})$).

Наличие гармонических составляющих в спектрах один из признаков чисто механической природы колебаний, что еще раз подтверждает вывод, что ТВС совершает колебания именно на этих частотах.

Частота 8,7 Гц (обозначение – $f(АСВ_{1К})$) является частотой первой корпусной акустической стоячей волны. АСВ является суперпозицией прямой (падающей) волны давления и отраженной от какого-либо препятствия. Если говорить именно о АСВ_{1К}, то максимальная пульсация давления наблюдается по оси реактора (пучность), минимальные (узлы) на крышках горячих коллекторов в парогенераторах. Полная информация о поле акустических стоячих применительно к РУ ВВЭР-1200 представлена в авторской монографии [8], а также в работах [17,18]. Однако, следует обратить внимание на следующий факт. В связи с широким распространением мобильных анализаторов сигналов и специализированного программного обеспечения возникло неправильное представление о сути спектрального преобразования и используемых единицах измерения. На рисунках 3 и 4 показаны рассчитанные спектры ДПЗ, имеющие по оси Y в качестве единицы измерения «автоспектральную

³ Сборка тепловыделяющая ядерного реактора. Пояснительная записка 2006.В.132.&.0UJA&&.ЖКА&&.021СА. 0006 392М.06.16.01 ПЗ. – Подольск: АО ОКБ «Гидропресс», 2009 – 102 с.

⁴ Обоснование точности определения частоты и ее погрешности при нейтронно-шумовых измерениях обосновано одним из авторов в работе [10] стр. 52–58.

плотность мощности (АСПМ)», размерность, которой представляет собой исходные единицы временного сигнала (например, В, мкА, мм), деленные на частоту в квадрате, в нашем случае – $A^2/\text{Гц}$.

Частой ошибкой является попытка оценить амплитуду колебаний на определенной частоте в абсолютных единицах, исходя из спектральных данных. Это неверно, так как спектральная плотность не является амплитудой сигнала. АСПМ – это энергетическая характеристика, т.е. оценка энергии в определенном диапазоне частот, поскольку квадрат амплитуды является энергетической характеристикой процесса. Поэтому резонанс, имеющий в спектре не самую большую амплитуду, но лежащий на широком основании может быть по энергии вибрации более опасен, чем узкий пик с большой амплитудой. Именно по этой причине колебание на частоте АСВ_{1к} может быть гораздо опаснее, чем на оборотной частоте ГЦНА (обозначение $-f(\text{ГЦНА}_{1\text{обр}})$). Колебание на частоте 8,7 Гц имеет глобальный характер и регистрируется всеми ДПЗ, но что указывает резонанс в функциях когерентности (рис. 4б и рис. 4з). В отчете (см. сноску 1) расчет параметров напряженно-деформируемого состояния (НДС) ТВС-5 для частоты вибронагрузки 8,7 Гц отсутствует.

Резонансы на частоте 16,6 Гц (обозначение $-f(\text{ГЦНА}_{1\text{обр}})$), 33,2 Гц (обозначение $-f(\text{ГЦНА}_{2\text{обр}})$) широко описаны в работах [19,20] и представляют собой первую и вторую гармонику оборотной частоты ГЦНА.

Как видно из рисунка 4 значимых отличий между вибрационным состоянием ТВС-5 (03-36) и штатной ТВС (02-29) в низкочастотной области не выявлено, следовательно особенности конструкции ТВС-5 не влияют ни на частотный состав вибрации, ни по всей видимости, на величину амплитуды колебаний. Необходимо решить вопрос о стабильности вибрационного состояния, т.е. в отсутствии смещения частотных резонансов. На рисунке 5 представлены АСПМ ДПЗ для двух, описанных выше ТВС, полученных с интервалом около 1 месяца. В течении 3 месяцев эксплуатации не выявлено дрейфа

обсуждаемых резонансов, что полностью подтверждает гипотезу о стабильности вибрационного состояния ТВС, в том числе и ТВС-5.

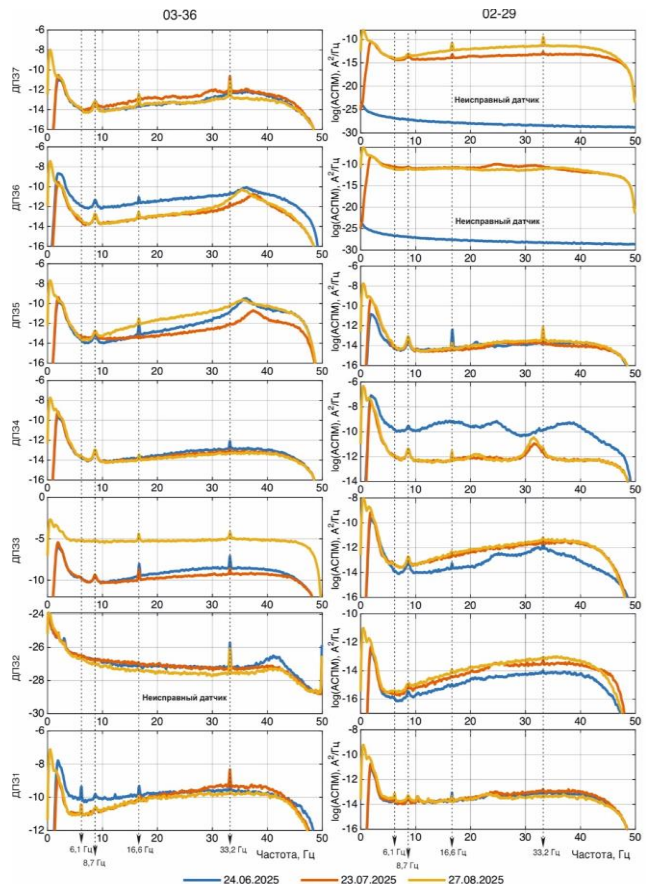


Рисунок 5. Автоспектральные плотности мощности сигналов ДПЗ, задействованных в эксперименте для ТВС 03-36 и ТВС 02-29 в диапазоне от 0 Гц до 50 Гц в разные моменты времени

Figure 5. Autospectral power densities of the direct charge sensors signal involved in the experiment for fuel assembly 03-36 and fuel assembly 02-29 in the range from 0 Hz to 50 Hz at different time points

Высокочастотный диапазон

В качестве высокочастотного диапазона в данной работе будет рассмотрен интервал колебаний от 50 Гц до 200 Гц. Долгое время данная зона подробно не исследовалась, но как было отмечено выше с появлением новых технических средств прецизионного класса, внесением изменений в конструкцию ДПЗ и разработкой авторами методологии многоканальных синхронизированных измерений (подробнее источники [9,10]) появилась возможность оценки нейтронных шумов в высокочастотном диапазоне. Так, в источнике [9] представлены некоторые

спектральные оценки нейтронного шума в высокочастотном диапазоне, а в [10] доказана возможность использования высокочастотной составляющей нейтронного шума для оценки состояния АЗ.

Несомненно, возникает вопрос, а для чего необходимо тщательное исследование указанной области, если в предыдущем разделе доказана идентичность вибрационного состояния ТВС-5 и штатной ТВС. Ответ кроется в особенностях конструкции ТВС-5, а именно в отсутствии фиксации твэл в решетке нижнего узла (для упрощения сборки/разборки ТВС). Согласно Отчету о научно-исследовательской работе «Вибрационные испытания макета №2 ТВС-5»⁵, собственные частоты колебаний твэл находятся в полосе частот от 50 Гц до 200 Гц. На рисунке 6 представлены спектральные оценки для всех ДПЗ сборок 03-36 (ТВС-5) и 02-29 (штатная ТВС) в указанном диапазоне – рисунки 6а и 6в, а также полный перебор функций когерентности для всех пар каждой ТВС – рисунки 6б и 6г.

Первое на что следует обратить внимание это присутствие в спектрах мощных резонансов на частотах 100 Гц и 150 Гц (выделено красным цветом). Это помехи от наводок электрического тока, соответственно вторая и третья гармоника от частоты переменного тока 50 Гц. Первая гармоника фильтруется специальным режекторным фильтром, поэтому в спектральных оценках она отсутствует. Далее, в спектрах ТВС-5 и штатных ТВС имеются общие частоты: 139,3 Гц и 166,1 Гц (промаркированы черным цветом), при этом колебания на данных частотах регистрируется всеми ДПЗ, о чем говорит величина функции когерентности, достигающая значений ~0,6. Скорее всего колебания на данных частотах имеют механическую природу. Однако в спектрах штатных ТВС есть резонансы отсутствующие в спектрах ТВС-5: 113,9 Гц и 120,7 Гц (отмечены синим цветом), имеющие также высокие значение функции когерентности. Логично предположить, что наблюдаемые ча-

стотные максимумы соответствуют колебаниям твэл, сегментам твэл (участок между дистанционирующими решетками), каркаса, собственно измерительного канала и др. Однако пока такие выводы делать преждевременно и нецелесообразно ввиду недостаточности данных. Для интерпретации экспериментальных данных и нужны результаты стендовых испытаний макетов ТВС-5. К сожалению, в Отчете о научно-исследовательской работе «Вибрационные испытания макета №2 ТВС-5»⁵ собственные частоты колебаний представлены интервальной величиной, а не численной оценкой с указанием точности. Поэтому прямая интерпретация экспериментальных данных по результатам стендовых испытаний затруднительна.

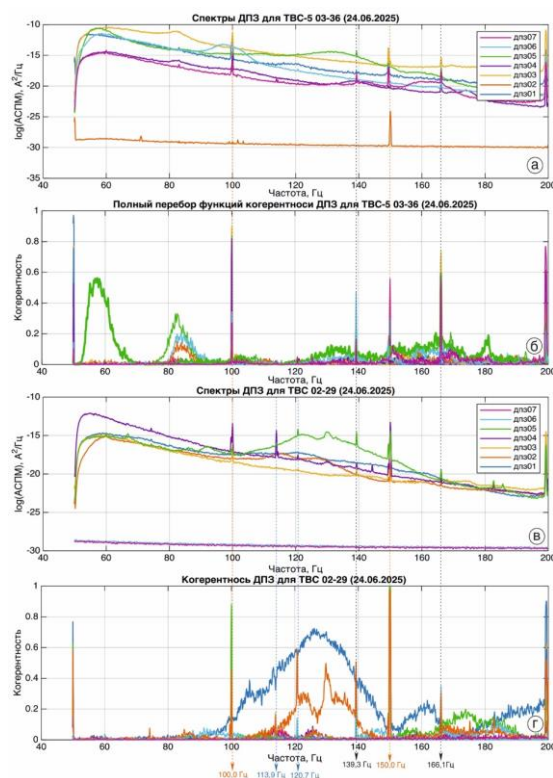


Рисунок 6. Автоспектральные плотности мощности сигналов ДПЗ, задействованных в эксперименте для ТВС 03-36 (а) и ТВС 02-29 (в) в диапазоне от 50 Гц до 200 Гц. Соответствующие функции когерентности для ТВС 03-36 (б) и ТВС 02-29 (г)

Figure 6. Autospectral power densities of the direct charge sensors signals involved in the experiment for fuel assembly 03-36 (a) and fuel assembly 02-29 (v) in the range from 50 Hz to 200 Hz. The corresponding coherence functions for fuel assembly 03-36 (б) and fuel assembly 02-29 (г)

⁵ Отчет о научно-исследовательской работе. Вибрационные испытания макета №2 ТВС-5. 545-О-004. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2022. – 34 с.

Выводы

В представленной статье впервые предпринята попытка оценить вибрационного состояния ТВС пятого поколения (ТВС-5) на основе интерпретации нейтронно-шумовой сигналов ДПЗ. Методы выделения и фиксации шумовой составляющей различных вариативных сигналов, а также алгоритмы ее обработки сложны, требуют дополнительного обучения и определенного опыта работы. Скорее всего именно этими причинами объясняется существенное снижение интереса к экспериментальным работам по шумовой тематике на различных РУ в мировой практике и в РФ. Из представленных в статье примеров следует, что нейтронно-шумовые методы контроля обладают несомненными преимуществами для постоянного эксплуатационного мониторинга ТВС, ТВЭЛ и другого внутрикорпусного оборудования. Главными достоинствами нейтронно-шумовых методов контроля состояния РУ авторы считают:

- пассивность;
- высокая чувствительность к аномалиям;
- возможность работы в эксплуатационных условиях;
- точная локализация дефектов;
- уникальность по отношению к некоторым типам неисправностей.

Экспериментально выделены частоты колебаний ТВС-5: 6,1 Гц, 8,7 Гц, 12,3 Гц, 16,6 Гц и 33,2 Гц, представлена интерпретация источников возникновения вибрации. Произведено сравнение вибрационного состояния ТВС-5 и штатной ТВС в низкочастотном диапазоне, выявлено полное совпадение по частотному составу. Необходимо отметить, что предварительный расчет НДС ТВС-5 проводился на основе других частотных составляющих по Отчету о научно-исследовательской работе (см. сноску 1): 5,0 Гц; 10,0 Гц; 16,5 Гц и 33,0 Гц. Таким образом, заложенные в расчетный код данные не являются корректными и не соответствуют экспериментальным данным. Но учитывая фактически полную идентичность вибрационного состояния ТВС-5 и штатных ТВС в низкочастотной области, авторы полагают,

что указанная неточность в оценке не критична, т.к. штатные ТВС для РУ ВВЭР-1200 работают надежно и длительное время, несмотря на то, что расчет НДС проводился с такими же исходными данными по частотным составляющим. В дальнейшем, целесообразно использовать реальные экспериментальные данные.

Наличие в спектрах ДПЗ горизонта 1 резонанса на частоте 6,1 Гц свидетельствует как в ТВС-5, так и в штатных ТВС о вибрации ТВС на первой изгибной частоте, а отсутствие тренда частоты в низкочастотную область о надежной фиксации ТВС в АЗ.

За три последовательных измерения не выявлено смещения резонансов, что говорит о стабильности и неизменности вибрационных состояний ТВС. Необходимо отслеживать как изменение частоты спектральных максимумов, так и их амплитудных значений. Отклонение частоты резонанса в большую или меньшую сторону характеризует изменение массы или жесткости динамической системы (подробнее – работы [8,10]). В предположении, что масса ТВС измениться не может, то логично связать дрейф частоты с трансформацией жесткости, а это, в свою очередь, сигнализирует о модификации условий закрепления.

В представленной работе впервые произведен анализ высокочастотных колебаний ТВС-5 и произведено сравнение с вибрационным состоянием штатных ТВС при совместных измерениях нейтронно-шумовых параметров. Из полученных данных следует, что в спектрах ТВС-5 и штатных ТВС имеются общие частотные максимумы: 139,3 Гц и 166,1 Гц. В тоже время в спектрах штатных ТВС есть резонансы: 113,9 Гц и 120,7 Гц, которые отсутствуют в спектрах ТВС-5. С достаточной степенью уверенности интерпретировать данные максимумы пока не представляется возможным.

Не смотря на кажущуюся глобальность исследования и большой объем данных, начатую работу необходимо продолжать. Необходимо скрупулезно и последовательно отслеживать любые изменения спектрального состава ДПЗ как для ТВС пятого поколения, так и штатных ТВС. Если низкочастотный диапазон изучен достаточно хорошо, то

высокочастотный только в самом начале освоения. Резонансы в указанном интервале несут информацию о вибрации ТВЭЛ и элементов ТВЭЛ (между ДС), что критично по отношению именно к ТВС-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Литвинов И.И. Фабрикация МОКС-топлива с минорными актинидами. Новая технологическая платформа атомной энергетики: Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня основания Сибирского химического комбината. Северск, 23–25 апреля 2024 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. С. 15. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69113383&ysclid=midamhkcmg546763372> (дата обращения: 26.08.2025).

Litvinov I.I. Fabrication of MOX fuel with minor actinides. New technological platform of nuclear energy: Abstracts of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 75th Anniversary of the Siberian Chemical Plant. Seversk, April 23–25, 2024. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2024. P. 15. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69113383&ysclid=midamhkcmg546763372> (accessed: 26.08.2025).

2. Брянский М.Н., Дружинин Р.И., Лаптев С.К. Разрешение кризиса развития современной ядерной энергетики за счет эксплуатации СНУП топлива. Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения: Отраслевая научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 60-летию СТИ НИЯУ МИФИ в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ, Северск, 09–13 декабря 2019 года. Северск: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2019. С. 18. Режим доступа: <https://www.sti.mephi.ru/index.php?do=download&id=1018&area=static&ysclid=midb2xfbaq965767481> (дата обращения: 26.08.2025).

Bryansky M.N., Druzhinin R.I., Laptev S.K. Resolving the crisis of modern nuclear energy development through the use of SNUF fuel. Innovations in the Nuclear Industry: Challenges and Solutions: Industry-Specific Scientific and Practical Conference for Students, Postgraduate Students, and Young Scientists Dedicated to the 60th Anniversary of the СТИ НИЯУ МИФИ as Part of the Scientific Session at NRC МЕРPhI, Seversk, December 9–13, 2019. Seversk: National Research Nuclear University МЕРPhI, 2019. P. 18. (In Russ.). Available at: <https://www.sti.mephi.ru/index.php?do=download&id=1018&area=static&ysclid=midb2xfbaq965767481> (accessed: 26.08.2025).

3. Фам В.Х., Терехова А.М., Сахаува Р.М., Тишина И.А. Обоснование возможности использования ТВС с РЕМИКС топливом в активной зоне реакторов ВВЭР. Будущее атомной энергетики: Тезисы докладов XIV Международной научно-практической конференции, Обнинск, 29–30 ноября 2018 года. Часть 1. Обнинск: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2019. С. 71–72. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=cewoww&ysclid=midb8fec53452735993> (дата обращения: 26.08.2025).

Fam V.Kh., Terekhova A.M., Sakhauva R.M., Tishina I.A. Justification of the possibility of using TVS with REMIX fuel in the core of VVER reactors. The future of nuclear power: Abstracts of the 14th International scientific and practical conference, Obninsk, November 29–30, 2018. Part 1. Obninsk: National Research Nuclear University МЕРPhI, 2019. P. 71–72. (In Russ.). Available at: <https://www.sti.mephi.ru/index.php?do=download&id=1018&area=static&ysclid=midb2xfbaq965767481> (accessed: 26.08.2025).

4. Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н. Проблемы и решения по разработке и внедрению конструкции ТВС-2М с увеличенной загрузкой топлива для перспективных топливных циклов с удлиненными кампаниями. Сборник трудов ОКБ «Гидропресс». Выпуск 7, Часть 3. Подольск: Гидропресс, 2007. С. 631–638. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20360104&pff=1> (дата обращения: 26.08.2025).

Dragunov Yu.G., Ryzhov S.B., Vasilchenko I.N., Kobelev S.N. Problems and solutions in the development and implementation of the TVS-2M design with increased fuel loading for advanced fuel cycles with extended campaigns. Collection of Works by the Hidropress experimental design bureau. Issue 7, Part 3. Podolsk: Hidropress, 2007. P. 631–638. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20360104&pff=1> (accessed: 26.08.2025).

5. 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>

6. 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>

7. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР. *Труды НГТУ им. П.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)

8. 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://elilib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p2/ (дата обращения: 08.09.2025).

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://elilib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/p0/ (accessed: 08.09.2025).

9. 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: 08.09.2025).

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: 08.09.2025).

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=d85d6ba3b1cda6ed461dfbfff281ee&irbDb=ESVODT> (дата обращения: 08.09.2025).

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=d85d6ba3b1cda6ed461dfbfff281ee&irbDb=ESVODT> (accessed: 08.09.2025).

11. 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., Khairetdinov 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>

12. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Под ред. А.А. Абагян. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с. ISBN 5-283-00787-1. Режим доступа: <https://diaprom.ru/publication/?id=7> (дата обращения: 08.09.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. VVER Vibronoise diagnostics. Edited by A.A. Abagyan. Moscow: Energoatomizdat, 2004. 344 p. ISBN 5-283-00787-1. (In Russ.). Available at: <https://diaprom.ru/publication/?id=7> (accessed: 08.09.2025).

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: 08.09.2025).

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: 08.09.2025).

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_54.

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 R.E. Alekseev*. 2022;1(136):54–67. (In Russ.). https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_54

15. Поваров В.П., Голубев Е.И., Жук М.М. Физика реактора ВВЭР-1200 и эксплуатационные вопросы: Научно-практическое пособие. Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», 2025. Белгород: Константа, 2025. 332 с. ISBN 978-5-907903-23-4. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/24945c8f-a0a0-440b-a4ac-14b97d9b2d59> (дата обращения: 29.08.2025).

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. ISBN 978-5-907903-23-4. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/24945c8f-a0a0-440b-a4ac-14b97d9b2d59> (accessed: 29.08.2025).

16. Драгунов Ю.Г., Дранченко Б.Н., Абрамов В.В., Хайретдинов В.У. Вибродинамические исследования в обоснование проектных решений ВВЭР. Сборник докладов 5-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 29 мая – 1 июня 2007 г., ОКБ «Гидропресс», Подольск. Т. 2. С. 356–375. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_1181595/ (дата обращения: 29.08.2025).

Dragunov Yu.G., Dranchenko B.N., Abramov V.V., Khayretdinov V.U. Vibration-dynamic studies to support design decisions for VVER reactors. Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference «Ensuring the Safety of VVER Nuclear Power Plants», May 29-June 1, 2007, OKB Hidropress, Podolsk. Vol. 2, P. 356–375. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_1181595/ (accessed: 29.08.2025).

17. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;4:110–121. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.10>

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. Phenomenology of acoustic standing waves applied to the VVER-1200 reactor plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2021;4:110–121. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.10>

18. 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>

19. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Оценка вибраций ГЦНА при совместном использовании диагностических систем. *Новое в российской электроэнергетике*. 2022;6:33–40. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48728937> (дата обращения: 29.08.2025).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. Assessment of GCNA Vibrations Using Diagnostic Systems. *New in Russian power engineering*. 2022;6:33–40. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48728937> (accessed: 29.08.2025).

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, Воронежская область, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5563-0526>

e-mail: tymofeecht@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 29.09.2025

После доработки / Revision 25.11.2025

Принята к публикации / Accepted 02.12.2025

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

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-08>

УДК 621.039

EDN TXLNV1


Оригинальная статья / Original paper



**Идентификация текущих состояний
главных циркуляционных насосов АЭС**

В.Г. Бекетов  , В.Я. Шпицер 

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

 vgbektov@mephi.ru

Аннотация. Декларируется универсальный (не опирающийся на частные законы деградации) подход к идентификации текущих состояний технологических систем АЭС. Фрагмент технологической системы анализируется в пространстве диагностических признаков (параметров) с доминирующим критерием. Системной границей выделенного фрагмента является поверхность, образуемая нормативными ограничениями значений диагностических признаков. На временных рядах параметрического мониторинга конструируется отображение (вероятностное) системы в единичный гиперкуб для представления ее эволюции в категориях деградации (движение к нормативным границам). Сконструированный виртуальный (возможный цифровой) образ системы аппроксимируется полиномом Колмогорова-Габор, который используется в качестве экстраполятора. Исследуются предсказательные возможности подхода для реального объекта: «Маслосистема главного циркуляционного насоса (ГЦН)». Методика является упрощенным вариантом многомерного статистического анализа, когда многомерная функция распределения параметров не является нормальной и не может восстанавливаться в реальном времени. Классическая теория подменяется задачей идентификации в пространстве одномерных эмпирических функций распределения измерений диагностических признаков. Методика хорошо зарекомендовала себя на таких деградациях как износ, старение, образование отложений, эрозия поверхности. Способность предсказания мгновенных отказов (скачки превышения предела) реализуется по возмущениям соответствующих функций распределения. Методика требует большого объема статистического материала, поэтому предпочтительна для сопровождения стационарных режимов эксплуатации оборудования или обработки архивов. Ожидается ее применение при программировании «наблюдателей» за развитием нештатных ситуаций и обучении нейросетей.

Ключевые слова: техническая диагностика, многомерный статистический анализ, мониторинг показателей, дефектность, деградация, оборудование АЭС.

Для цитирования: Бекетов В.Г., Шпицер В.Я. Идентификация текущих состояний главных циркуляционных насосов АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):78–85. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-08>


For citation: Beketov V.G., Shpitser V.Ya. Identification of current states of the main circulation pumps at NPPs. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):78–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-08>

Identification of current states of the main circulation pumps at NPPs

Vladimir G. Beketov  , Vladimir Ya. Shpitser 

Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,

Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 vgbektov@mephi.ru

Abstract. The paper presents a universal approach (not based on specific degradation laws) to identifying the current states of NPP technological systems. A fragment of the technological system is analysed in the space of diagnostic features (parameters) with a dominant criterion. The system boundary of the selected fragment is the surface formed by the normative restrictions on the values of diagnostic features. A probabilistic mapping of the system is constructed in a unit hypercube on the time series of parametric monitoring to represent its evolution in terms of degradation (movement

towards normative boundaries). The constructed virtual (possible digital) image of the system is approximated by a Kolmogorov-Gabor polynomial which is used as an extrapolator. The predictive capabilities of the approach are investigated for a real object: «The Oil System of the Main Circulation Pump (MCP)». The methodology is a simplified version of multidimensional statistical analysis, where the multidimensional distribution function of parameters is not normal and cannot be restored in real time. The classical theory is replaced by the task of identifying one-dimensional empirical distribution functions of diagnostic feature measurements in space. The method has proven itself well in cases of degradation such as wear, ageing, deposit formation, and surface erosion. The ability to predict instantaneous failures (limit exceedance jumps) is implemented based on disturbances in the corresponding distribution functions. The method requires a large amount of statistical material, so it is preferable for monitoring stationary modes of equipment operation or processing archives. It is expected to be used in programming «observers» to monitor the development of abnormal situations and training neural networks.

Keywords: technical diagnostics, multidimensional statistical analysis, performance monitoring, defectiveness, degradation, nuclear power plant equipment.

Введение

Состояние протекающих процессов и развитие аномалий режимов эксплуатации принято фиксировать в реальном времени по данным промышленного мониторинга. Эти данные идентифицируются сравнением с допустимыми уставками. Считается, что развитие аномалии можно обнаружить на ранней стадии средствами статистического анализа [1–3]. Обнаружение малых отклонений от режимов нормальной эксплуатации проявляется в возмущении многомерной функции распределения характерных признаков.

Предлагается заменить восстановление многомерной функции распределения характерных признаков анализом временных рядов эмпирических функций распределения этих признаков. Система идентифицируется эмпирической оценкой вероятности (по N измерениям) для каждого (из m) признаков иметь значение в нормативном поле. Результатом является вектор m эмпирических оценок, отнесенный к срединному моменту на периоде наблюдения T . Затем в скользящем с дискретом ΔT окне наблюдается эволюция этого вектора. Мониторинг становится средством построения m -мерной траектории в единичном гиперкубе, при этом значение N – предопределяет статистическую погрешность метода, а ΔT – динамическую. Реализуется своеобразная процедура сглаживания.

Контроль и управление маслосистемой каждой пары ГЦН осуществляется по одиннадцати штатным режимным параметрам [4–6]. Деградация проявляется в дрейфе опре-

деляющих технических показателей к нормативным границам и возрастании (амплитуд и частот) флуктуаций их значений. При выходе за диапазон нормальной эксплуатации доминирующего критерия (температуры масла), автоматически срабатывают соответствующие блокировки и ГЦН отключаются. Превышение уставок является технологическим нарушением. Прогнозирование вероятности технологических нарушений при эксплуатации АЭС – актуальная проблема и основная тема данной статьи.

Технология обработки данных

Протокол измерений, как правило, в формате Excel содержит семейство временных рядов (по числу измеряемых параметров). Это нестационарные последовательности разноразмерных, разномасштабных, зашумленных, часто коррелированных физических величин. Построить многомерный анализатор, осуществляющий функцию идентификатора состояний объекта и экстраполятора в реальном времени затруднительно. Ограничиваются статистической обработкой каждого параметра отдельно.

Вероятность нахождения параметра внутри нормативного поля, оцененная по его временному ряду, представляется выражением (1):

$$P_{k,j} = F_{N_s}^j(b_j) - F_{N_s}^j(a_j);$$

$$s = k\Delta N; j = 1, \dots, m, \quad (1)$$

где k – номер скользящего окна (номер строки матрицы P); ΔN – смещение скользящего окна;

s – текущий номер строки матрицы наблюдений, с которого измерения включаются в окно шириной N ;

a_j, b_j – нижний и верхний нормативный предел параметра j соответственно;

$$F_{N_s}(x) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} I\{x_i \leq x\};$$

$$I = \begin{cases} 1 - \{A\} = True \\ 0 - \{A\} = Falshe \end{cases} \quad \text{– эмпирическая}$$

функция распределения измерений x_i параметра j [7,8].

Таким образом, каждые N чисел протокола наблюдений заменяются одним числом матрицы P , имеющей m столбцов и число строк, необходимых для построения траектории эволюции объекта в единичном m -мерном гиперкубе. Каждая точка на этой траектории означает вероятность нахождения параметров объекта в нормативном поле и может быть оценена значением $P_k = \prod_j P_{k,j}$.

В терминах дополнительных событий вероятность $D_k = 1 - P_k$ означает текущий уровень дефектности объекта. Траектория в единичном m -мерном гиперкубе вероятностей D отражает деградацию объекта. Любой из столбцов матрицы P можно попытаться выразить через остальные с помощью регрессионной модели. Это классический способ идентификации технологических объектов и построения полиномиальных экстраполяторов, применяемый в обычных физических пространствах [8]. В данной интерпретации он используется в виртуальном

пространстве, сконструированном на вероятностях.

На плоскости $(P_k \times k)$ определим линейный экстраполятор, который по двум последовательным парам (P_k, k) ; $(P_{k+1}, k+1)$ вычисляет момент k^* достижения состояния условно принимаемого за предвестник отказа, например, $P_{k^*} = 0.5$. Это позволяет принимать решение об отключении технологической системы ориентируясь не только на вероятность отказа, но и на его «близость» к текущему моменту наблюдения.

Маслосистема главного циркуляционного насоса (ГЦН)

Маслосистема ГЦН выполняет обеспечивающие функции в режиме нормальной эксплуатации. В ее состав входят две функциональные группы, каждая из которых обеспечивает маслом два ГЦН. Функциональная группа включает: технологические емкости; маслонасосы; маслофильтры; маслоохладители; арматуру и трубопроводы. Исходные события развития нештатных ситуаций условно классифицируются в три множества: отказы системы в целом, выводящие за пределы работоспособности и требующие аварийного ремонта; нарушения работы элементов системы, препятствующие дальнейшей работоспособности и требующие вмешательств операторов; срабатывания технологических защит, а также выход из также смежных систем. Основные технологические параметры функциональной группы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры контроля работоспособности маслосистемы ГЦН [составлено авторами]
Table 1. Parameters of monitoring the performance of the MCP oil system [compiled by the authors]

| № п/п | Наименование | Назначение | Единица измерения | Диапазон допустимых значений |
|-------|---|--|---------------------|------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Температура масла на всасе насосов | Масло для охлаждения и смазки электродвигателя ГЦН | °С | 0 – 50 |
| 2 | Давление масла на напоре маслонасоса | Масло для охлаждения и смазки электродвигателя ГЦН | ккг/см ² | 3,06 – 5,15 |
| 3 | Давление масла за маслофильтрами | Масло для охлаждения и смазки электродвигателя ГЦН | ккг/см ² | 3,6 – 5,5 |
| 4 | Переход давления на фильтре, не более | Масло для охлаждения и смазки электродвигателя ГЦН | ккг/см ² | 0,5 |
| 5 | Температура технической воды на сливе маслоохладителя | Вода для охлаждения теплообменников маслосистемы ГЦН | °С | +15 |

Продолжение таблицы 1

Table 1 continuation

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|--|----------------------|--------------------------------------|
| 6 | Расход механической воды на сливе маслоохладителя | Вода для охлаждения теплообменников маслосистемы ГЦН | м ³ /час | 95 – 125 |
| 7 | Температура масла на входе в ГЦН | Масло для охлаждения и смазки электродвигателя ГЦН | °С | 33 – 45 |
| 8 | Давление масла в камере ГУП ГЦН | Масло для охлаждения и смазки электродвигателя ГЦН | кгс/ см ² | 0,6 – 0,7 (1,3) 1,15 – 1,25 (2,4) |

С учетом опыта эксплуатации маслосистемы ГЦН выделяют факторы, влияющие на работоспособность:

1) засорение масляного фильтра, фиксируемое при достижении перехода давления на работающем фильтре более 0,35 кгс/ см² и температуре масла на входе в ГУП ГЦН не более 39,5°С;

2) загрязнение теплообменной поверхности маслоохладителя, фиксируемое по увеличению температурного порога более 15°С;

3) снижение расхода охлаждающей технической воды.

Опыт эксплуатации позволяет уменьшить число параметров, принимаемых для описания системы. Например, если в качестве основного контролируемого параметра выбирается температура масла на входе в ГЦН, то виброакустические характеристики и измерения перепада давления на вспомогательных фильтрах можно исключить. Кроме того, ширину допустимых интервалов изменения контролируемых величин можно уменьшить (своего рода уставки). Это поз-

воляет при многовариантном исследовании предложить градацию дефектности состояний оборудования. В статье используются восемь определяющих величин.

Образ состояния системы в нормальных условиях эксплуатации (НУЭ)

Маслосистема ГЦН контролировалась с дискретностью ~ 12.5 мин., в течение ~ 21 сут. Представляем результаты обработки протокола мониторинга, содержащего ~ 7400 измерений восьми параметров одновременно. Первые сутки (~ 1152 изм.) использовались для составления образа НУЭ. Для этого зафиксируем нормативные пределы изменения технологических параметров за сутки, так что вероятность пребывания в нормативном поле для всех измерений равна 1. Эволюция системы будет отображаться относительно этого исходного состояния. Обозначим параметры $X^{(j)}$, $j = 0, \dots, 7$. Образ исходного состояния НУЭ представлен в таблице 2.

Таблица 2. Образ состояния системы в нормальных условиях эксплуатации [составлено авторами]

Table 2. System status under normal operating conditions [compiled by the authors]

| Значения | $X^{(0)}$ | $X^{(1)}$ | $X^{(2)}$ | $X^{(3)}$ | $X^{(4)}$ | $X^{(5)}$ | $X^{(6)}$ | $X^{(7)}$ |
|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Среднее | 45.07 | 37.61 | 35.30 | 0.965 | 36.30 | 63.29 | 32.72 | 7.704 |
| Коэффициент вариации | $9.16 \cdot 10^{-3}$ | $6.91 \cdot 10^{-3}$ | 0.011 | $4.66 \cdot 10^{-3}$ | 0.011 | 0.028 | 0.021 | 0.231 |
| Нормативные пределы | 44 - 47 | 36 - 39 | 34 - 37 | 0.85–.98 | 35-39 | 55-70 | 30-35 | 6.5-9.0 |

В качестве доминирующего индикатора выбран $X^{(4)}$ – температура масла на входе в ГЦН. Эволюция этого индикатора в течение 21 сут. представлена на рисунке 1: выявляется временной отрезок 139 час. (номера измерения 2673 – 3341), на котором фиксируется резкий выброс за границу верхнего предела 39°С. Это технологическое нарушение. Область, содержащая нарушение нормаль-

ных условий эксплуатации «Def» (номера измерения 2000 – 4000), представлена отдельно.

На рисунке 2 Представлена эволюция вероятности иметь значения температуры масла в нормативном коридоре. Вычисления проводились от состояния НУЭ по эмпирической функции распределения в скользящем окне шириной 1000 чисел и смещении

на 300 чисел. Образ технологического нарушения фиксируется однозначно. Динамика развития технологического нарушения может адаптивно уточняться за счет уменьшения шага скользящего окна, например до 50, 30, 10 чисел.

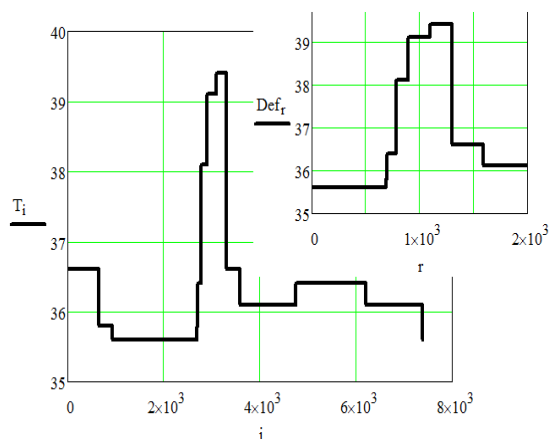


Рисунок 1. Изменение температуры масла на входе в ГЦН в течение 21 сут. [составлено авторами]

Figure 1. Change in oil temperature at the inlet to the central heating system over 21 days [compiled by the authors]

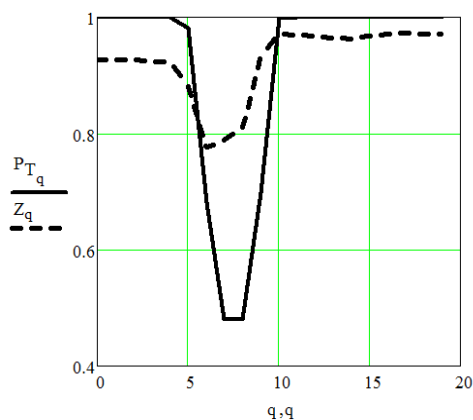


Рисунок 2. Эволюция вероятности имеет значения температуры масла в нормативном коридоре [составлено авторами]

Figure 2. Probability evolution has oil temperature values within the standard range [compiled by the authors]

Вычисления проводились от состояния НУЭ по эмпирической функции распределения в скользящем окне шириной 1000 чисел и смещении на 300 чисел. На полотне рисунка 2 представлена регрессия Z выражающая полиномиальную зависимость температуры масла в нормативном коридоре от учитываемых остальных факторов технологической схемы.

Идентификация системы

В парадигме «семь входов – один выход» построена адаптивная регрессионная модель маслосистемы ГЦН, выражающая вероятность иметь температуру масла на входе ГЦН в нормативном коридоре (см. рис. 2) через соответствующие вероятности остальных технологических факторов. В категориях деградации это трактуется как учет доминирующих каналов переноса дефектности. Размерность пространства предопределяет сложность прогностической модели. На редуцированном пространстве вероятностей $m = 4$ задавалась математическая модель наблюдаемого реального объекта в форме многочлена Колмогорова – Габора, составленного из элементов матрицы P_{kj} , $k = 0 \dots 19$, $j = 0 \dots 3$. Эта модель поддерживает вероятностную интерпретацию, является базовой в методе группового учета аргументов (МГУА) [9]. Метод не только оценивает коэффициенты регрессионной модели, но и определяет структуру полинома оптимальной сложности (число членов полинома). Модели возрастающей сложности порождаются до тех пор, пока не будет найден минимум некоторого критерия (*внешний критерий*) качества модели. Достижение глобального минимума внешнего критерия при порождении моделей означает, что модель, доставляющая такой минимум, является искомой. Индуктивный алгоритм отыскания модели оптимальной структуры в задаче прогнозирования нештатных ситуаций состоит из следующих основных шагов:

1. Результат мониторинга представляется матрицей M , в которой столбцы – технологические факторы; строки – номера измерений.

2. По матрице измерений M формируется матрица P – эмпирических вероятностей, в которой столбцы – вероятности принадлежности факторов соответствующим нормативным допускам; строки – номера положений скользящего окна, принимаемые за моменты фиксации этих вероятностей.

3. Матрица P разбивается на три части $P1$ – обучающую; $P2$ – тестовую; $P3$ – контрольную.

4. Назначается базовая модель, которая описывает отношение между одним из

столбцов (критериальным признаком) и остальными столбцами матрицы P . Ограничимся полиномом Колмогорова-Габора второго порядка в виде выражения (2):

$$y_k = w_{k0} + \sum_{j=1}^{m_1-1} w_{kj} P_{kj} + \sum_{l=1}^{m_1-1} \sum_{j=1}^{m_1-1} w_{klj} P_{kl} P_{kj}, \quad (2)$$

где y_k – модельное значение критериального признака;

w – вектор весовых коэффициентов (параметры математической модели);

m_1 – число обеспечивающих факторов в обучающей выборке P_1 .

Базовая модель линейна относительно параметров и нелинейна относительно свободных переменных. Для настройки параметров модели используется метод наименьших квадратов по обучающей выборке L (3):

$$\epsilon_L^2 = |y_L - y^m|^2 \rightarrow \min - \text{внутренний критерий.} \quad (3)$$

Результат представлен полиномом Z на рисунке 2.

На рисунке 3 изображена эволюция вероятности иметь значения всех восьми технологических параметров маслосистемы ГЦН одновременно в соответствующих им нормативных границах, т.е. вероятность НУЭ на интервале наблюдения. Вычисления проводились от исходного состояния НУЭ по произведению индивидуальных эмпирических функций распределения в скользящих окнах шириной 1000 чисел и смещении на 300 чисел. Образ технологического нарушения фиксируется однозначно.

На полотне рисунка 3 нанесены две сечущие, отражающие результат линейной экстраполяции. Функция $y_1(t_1)$ отражает деградацию маслосистемы ГЦН от начала наблюдения и прогнозирует возможность технологического нарушения в отдаленном будущем. Функция $y_2(t_2)$ отражает деградацию маслосистемы ГЦН от текущего состояния (предвестника инцидента) и сравнительно точно фиксирует момент необходимого эксплуатационного вмешательства.

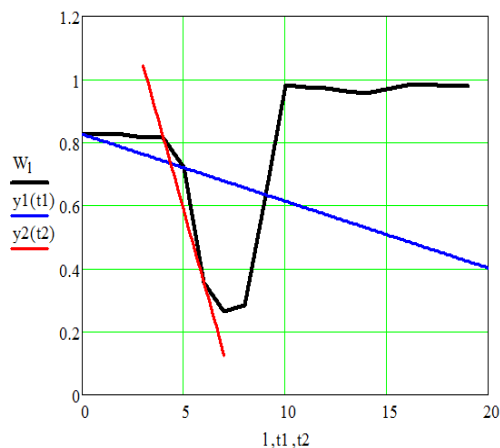


Рисунок 3. Эволюция вероятности НУЭ ГЦН на интервале наблюдения в состоянии ННУЭ – нарушение нормальных условий эксплуатации [составлено авторами]

Figure 3. Probability evolution of the main coolant pump (MCP) transitioning from normal operating conditions to a state of deviation from normal operating conditions over the observation interval [compiled by the authors]

Функция $y_1(t_1)$ отражает деградацию маслосистемы ГЦН от начала наблюдения и прогнозирует технологическое нарушение в отдаленном будущем. Функция $y_2(t_2)$ отражает деградацию маслосистемы ГЦН от текущего состояния (предвестника инцидента) и сравнительно точно фиксирует момент необходимого эксплуатационного вмешательства.

Заключение

Представлен непрерывный вычислительный процесс, сопровождающий регламентированный технологический режим с возможностью выявления причин его нарушения и прогнозированием нештатных ситуаций. В этой работе многомерная функция распределения представляется своими сечениями в форме одномерных эмпирических распределений по каждому признаку. На этих одномерных распределениях в единичном гиперкубе конструируется многомерная алгебраическая модель, которая используется в качестве экстраполятора. Прогностические возможности предлагаемого подхода иллюстрируются на сопровождении эксплуатационных режимов маслосистемы главных циркуляционных насосов (ГЦН) АЭС с ВВЭР-1000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белоусов П.А., Скоморохов А.О. Разработка и применение методов обнаружения свойств и прогнозирования временных рядов в задачах диагностирования АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2006;3:3–12. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2006/03.pdf> (дата обращения: 23.06.2025).

Belousov P.A., Skomorokhov A.O. Development and application of methods for property change discovery and time series forecasting in NPP diagnostics problems news of universities. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2006;3:3–12. (In Russ.). Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2006/03.pdf> (accessed: 23.06.2025).

2. Скоморохов А.О. Многомерные статистические методы диагностики аномальных состояний ЯЭУ Авто-реферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, специальность 05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2011. 42 с. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/2ea35e2a-9716-4260-a8fd-80609a8dec56> (дата обращения: 23.06.2025).

Skomorokhov A.O. Multivariate statistical methods for diagnosing abnormal states of nuclear power plants. Abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Obninsk: OINPE NRNU MEPhI. 2011, 42 с. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/2ea35e2a-9716-4260-a8fd-80609a8dec56> (accessed: 23.06.2025).

3. Вьюгин В.В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования. Москва: МЦНМО, 2021. 399 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012656764/?ysclid=mht76myhjb638045114 (дата обращения: 23.06.2025).

Vyugin V.V. Mathematical foundations of machine learning and forecasting. Moscow: MCNMO, 2021. 399 p. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_012656764/?ysclid=mht76myhjb638045114 (accessed: 23.06.2025).

4. Андрущенко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. Москва: Логос, 2010. 604 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/andrushechko_aes-s-reaktorom-vver-1000_2010/p4/ (дата обращения: 27.06.2025).

Andrushenko S.A., Afrov A.M., Vasiliev B.Yu., Generalov V.N. et al. Nuclear power plants with WWER-1000 reactors. From physical principles of operation to project evolution. Moscow: Logos, 2010. 604 p. (In Russ.). Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/andrushechko_aes-s-reaktorom-vver-1000_2010/p4/ (accessed: 27.06.2025).

5. Лескин С.Т., Слободчук В.С., Шелегов А.С. Анализ состояния ГЦН ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2016;4:12–22. Режим доступа: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.02> (дата обращения: 27.06.2025).

Leskin S.T., Slobodchuk V.S., Shelegov A.S. Analysis of the state of the WWER-1000 main circulation pump during operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016;4:12–22. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.02> (accessed: 27.06.2025).

6. Сысоев Ю.С., Бекетов В.Г., Симакова Н.А. Алгоритм прогнозирования дрейфа температур маслосистемы ГЦН блока АЭС с реактором ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;3(20):57–63. Режим доступа: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2016.3-5_0.pdf (дата обращения: 27.06.2025).

Sysoev Yu.S., Beketov V.G., Simakova N.A. Forecasting algorithm of temperature drift of main circular pump oil system of the NPP Unit with the VVER-1000 Reactor. *Global nuclear safety*. 2016;3(20):57–63. (In Russ.). Available at: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2016.3-5_0.pdf (accessed: 27.06.2025).

7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва: Физматлит, 2006. 816 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002917693?ysclid=mhuux5jzmz0342013706> (дата обращения: 09.07.2025).

Kobzar A.I. Applied Mathematical statistics. For engineers and scientists. Moscow: Fizmatlit, 2006. 816 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002917693?ysclid=mhuux5jzmz0342013706> (accessed: 09.07.2025).

8. Добронетц Б.С., Попова О.А. Вычислительный вероятностный анализ: модели и методы. Монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. 236 с. Режим доступа: <http://www-sbras.nsc.ru/interval/Library/AppBooks/DobronetsPopova-2020.pdf> (дата обращения: 09.07.2025).

Dobronets B.S., Popova O.A. Computational probability analysis: models and methods. Monograph. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2020. 236 p. (In Russ.). Available at: <http://www-sbras.nsc.ru/interval/Library/AppBooks/DobronetsPopova-2020.pdf> (accessed: 09.07.2025).

9. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. Москва: Радио и связь, 1987. 117 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009967610?ysclid=mi4vzzumpo278492159> (дата обращения: 09.07.2025).

Ivakhnenko A.G., Yurachkovsky Yu.P. Modeling of complex systems based on experimental data. Moscow: Radio i svyaz', 1987. 120 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009967610?ysclid=mi4vzzumpo278492159> (accessed: 09.07.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бекетов В.Г. – анализ экспериментальных данных, подбор литературных источников, редактирование текста статьи;

Шпицер В.Я. – написание текста статьи, подготовка к опубликованию результатов аналитического исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования. Инициативное исследование.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимир Георгиевич Бекетов, кандидат технических наук, доцент, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-0242-6745>

e-mail: vgbeketov@mephi.ru

Владимир Яковлевич Шпицер, доктор технических наук, профессор, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5051-5091>

e-mail: shpitser@mail.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Beketov V.G. – analysis of experimental data, selection of references, editing of article text;

Shpitser V.Ya. – writing the article text, preparing analytical research results for publication.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding. Initiative research.

CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir G. Beketov, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-0242-6745>

e-mail: vgbeketov@mephi.ru

Vladimir Ya. Shpitser, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-5051-5091>

e-mail: shpitser@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 11.07.2025

После доработки / Revision 30.09.2025

Принята к публикации / Accepted 07.10.2025

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-09>

УДК 004.4:621.396

EDN UNQPJF


Оригинальная статья / Original paper



Разработка специального программного обеспечения для организации и оценки характеристик источника сигнала в техническом канале утечки информации за счет электромагнитного излучения кабеля видеосистемы

Б.А. Красильников  , **А.А. Евстифеев** , **Д.Б. Николаев** 

Саровский физико-технический институт, филиал «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», физико-технический факультет, кафедра радиофизики и электроники

 Krasilnikov.Boris.Work@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке специального программного обеспечения (СПО) для организации источника сигнала в техническом канале утечки информации за счет электромагнитного излучения кабеля видеосистемы (VGA, DVI и др.). Представлен интерфейс и функциональные возможности разработанного специального программного обеспечения: главное окно программы и окно выбора характеристик тестового электромагнитного сигнала. При помощи разработанного специального программного обеспечения измерены значения напряжения на выходе измерительной антенны, соответствующего совокупности сигнала и помехи электромагнитного излучения кабеля VGA в зависимости от цвета, обрабатываемого видеосистемой средства вычислительной техники. Приведены результаты расчета значений напряжения сигнала на выходе измерительной антенны, соответствующих данным цветам. На основе рассчитанных значений цветам распределены условные места, обозначающие эффективность приема электромагнитного излучения кабеля VGA, возникающего при обработке видеосистемой средства вычислительной техники данных цветов.

Ключевые слова: технический канал утечки информации, ТКУИ, электромагнитное излучение, ЭМИ, программное обеспечение, кабель VGA.


Для цитирования: Красильников Б.А., Евстифеев А.А., Николаев Д.Б. Разработка специального программного обеспечения для организации и оценки характеристик источника сигнала в техническом канале утечки информации за счет электромагнитного излучения кабеля видеосистемы. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):86–93. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-09>

For citation: Krasilnikov B.A., Evstifeev A.A., Nikolaev D.B. Development of special software for organization and evaluation the characteristics of the signal source in the TEMPEST channel due to electromagnetic radiation from the video system cable. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):86–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-09>

Development of special software for organization and evaluation the characteristics of the signal source in the TEMPEST channel due to electromagnetic radiation from the video system cable

Boris A. Krasilnikov  , **Alexander A. Evstifeev** , **Dmitry B. Nikolaev** 

Sarov Institute of Physics and Technology the branch of the National Research Nuclear University MEPHI, Faculty of Physics and Technology, Department of Radiophysics and Electronics

 Krasilnikov.Boris.Work@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the development of special software for the organization of a signal source in a TEMPEST channel due to electromagnetic radiation from the video system cable (VGA, DVI, etc.). The interface and functionality of the developed special software are presented: the main program window and the window for selecting the characteristics of the test electromagnetic signal. Using the developed special software, the values of the voltage at the output of the measuring antenna were measured, corresponding to the combination of the signal and interference of the electromagnetic radiation of the VGA cable, depending on the color processed by the video

computer system. The results of calculating the voltage values of the signal at the output of the measuring antenna corresponding to these colors are presented. Based on the calculated values, conditional places are assigned to the colors, indicating the effectiveness of receiving electromagnetic radiation from a VGA cable that occurs when a video system processes these colors using computer technology.

Keywords: TEMPEST, electromagnetic radiation, EMR, software, VGA cable.

Введение

Одной из компонент при организации технического канала утечки информации (ТКУИ) за счет электромагнитного излучения (ЭМИ) компонентов средств вычислительной техники (СВТ) является информация, которая будет передаваться за счет ЭМИ [1–2]. Одним из самых эффективных источников ЭМИ в СВТ является видеосистема [3–6], одним из объектов которой является кабель, соединяющий графический процессор с устройством вывода (монитором). В ходе поисковых исследований было обнаружено несколько СПО, использование которых направлено лишь на демонстрацию существования ТКУИ за счет ЭМИ кабеля видеосистемы и не позволяет провести оценку характеристик источника сигнала. По данной причине разработка СПО, позволяющего провести такую оценку, является актуальной задачей.

Данная работа посвящена разработке СПО для организации источника сигнала в ТКУИ за счет ЭМИ кабеля видеосистемы и выявлению параметров, вызывающих наибольшее напряжение сигнала конкретного типа кабеля (VGA кабеля).

Практическая значимость данной работы и ее связь с проблемами глобальной ядерной безопасности заключается в следующем. Автоматизированные системы управления технологическими процессами объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) зачастую физически изолированы от общественных сетей. Однако ЭМИ кабелей видеосистем, по которым передается информация, создает риск возникновения ТКУИ. Разработанное СПО позволяет не просто продемонстрировать уязвимость, но и оценить параметры этого канала: возможность восстановления конкретной информации, потенциальную дальность перехвата, устойчивость сигнала к помехам. Таким образом, данное СПО имеет ключевое значе-

ние для организации эффективной защиты и проведения аттестации объектов КИИ.

Методы

Для выявления параметров, вызывающих наибольшее напряжение сигнала U_c (U_c – рассчитанное значение напряжения сигнала на выходе измерительной антенны дБ относительно 1 мВ) кабеля VGA, используемого при модуляции передаваемой информации в ТКУИ, проведено исследование зависимости U_c от цветовых характеристик изображений, обрабатываемых видеосистемой СВТ.

Результатами измерений являются напряжение помехи на выходе измерительной антенны $U_{\Pi}(f_{\Pi, n})$ и напряжение на выходе измерительной антенны, соответствующего совокупности сигнала и помехи $U_{C+\Pi}(f_{\Pi, n})$, выраженные в дБ относительно 1 мВ.

Перевод $U_{\Pi}(f_{\Pi, n})$ и $U_{C+\Pi}(f_{\Pi, n})$ из дБ относительно 1 мВ в дБ относительно 1 мкВ осуществляется посредством прибавления к результату, измеренному в дБ относительно 1 мВ, 60 дБ.

Перевод $U_{\Pi}(f_{\Pi, n})$ и $U_{C+\Pi}(f_{\Pi, n})$ из дБ относительно 1 мкВ в мкВ по следующим формулам (1) и (2):

$$\tilde{U}_{C+\Pi}(f_{\Pi, n})[\text{мкВ}] = 10^{\frac{U_{C+\Pi}(f_{\Pi, n})[\text{дБ}(\text{мкВ})]}{20}}, \quad (1)$$

$$\tilde{U}_{\Pi}(f_{\Pi, n})[\text{мкВ}] = 10^{\frac{U_{\Pi}(f_{\Pi, n})[\text{дБ}(\text{мкВ})]}{20}}. \quad (2)$$

Расчет значений напряжения сигнала на выходе измерительной антенны в соответствии с выражением (3):

$$\tilde{U}_c(f_{\Pi, n})[\text{мкВ}] = \sqrt{(\tilde{U}_{C+\Pi}(f_{\Pi, n})[\text{мкВ}])^2 - (\tilde{U}_{\Pi}(f_{\Pi, n})[\text{мкВ}])^2}. \quad (3)$$

Перевод полученного значения в дБ относительно 1 мкВ по формуле (4):

$$U_C(f_{\text{по},n})[\text{дБ(мкВ)}] = 20 \cdot \lg(\tilde{U}_C(f_{\text{по},n})[\text{мкВ}]) . \quad (4)$$

Интерфейс и функциональные возможности разработанного специального программного обеспечения

СПО разработано с использованием интерпретируемого объектно-ориентированного высокоуровневого языка программирования Python и имеет оконный графический интерфейс.

Главное окно программы.

На рисунке 1 приведено главное окно программы. Оно имеет фиксированный размер.

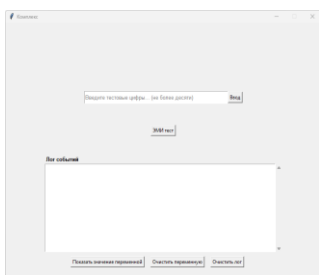


Рисунок 1. Главное окно программы [составлено авторами]

Figure 1. Main program window [compiled by the authors]

Элементы главного окна:

1) строка ввода, в которую можно ввести передаваемую тестовую последовательность, которая представляет собой последовательность из цифр, максимальное число которых – десять;

2) кнопка «Ввод», при нажатии на которую:

– введенная последовательность цифр сохраняется в память программы;

– происходит запись действия о вводе последовательности в лог;

– затем последовательность цифр преобразуется в битовую последовательность (по ASCII), которая также сохраняется в память программы;

– происходит запись действия о преобразовании последовательности в лог;

– строка ввода очищается;

3) кнопка «ЭМИ тест», при нажатии на которую:

– блокируются кнопки «Ввод», «Очистить переменную», «Очистить лог»;

– происходит запись действия о блокировке кнопок в лог;

– открывается дополнительное окно, в котором необходимо выбрать характеристики тестового сигнала, используемого для создания ЭМИ СВТ; результатом работы в данном окне является модуляция битовой последовательности ЭМИ кабеля VGA;

– происходит запись действия об открытии данного окна в лог;

4) поле лога, в котором записываются события, инициируемые пользователем;

5) кнопка «Показать значение переменной», при нажатии на которую в логе отображается сохраненное в памяти программы значение передаваемой тестовой последовательности;

6) кнопка «Очистить переменную», при нажатии на которую:

– из памяти программы удаляются значение передаваемой тестовой последовательности и значение преобразованной битовой последовательности;

– происходит запись действия об очистке переменной в лог;

7) кнопка «Очистить лог», при нажатии на которую поле лога очищается.

Окно выбора характеристик тестового электромагнитного сигнала.

На рисунке 2 приведено окно выбора характеристик тестового ЭМИ сигнала. Оно имеет фиксированный размер.

Элементы окна выбора характеристик тестового электромагнитного сигнала:

1) кнопка «Выбрать цвет» для бита «0», при нажатии на которую открывается дополнительное окно (стандартное окно цветовой палитры Windows) (рис. 2), в котором необходимо выбрать цвет, используемый для модуляции бита «0» в битовой последовательности;

2) строка, в которой наглядно отображается выбранный цвет, используемый для модуляции бита «0» в битовой последовательности;

3) кнопка «Выбрать цвет» для бита «1», при нажатии на которую открывается дополнительное окно (стандартное окно цветовой палитры Windows) (рисунок 2), в котором необходимо выбрать цвет, используе-

мый для модуляции бита «1» в битовой последовательности;

4) строка, в которой наглядно отображается выбранный цвет, используемый для модуляции бита «1» в битовой последовательности;

5) кнопка «Случайно», при нажатии на которую цвета назначаются случайным образом с существующими ограничениями, а именно: разрешены только основные цвета (без оттенков); белый цвет запрещен к выбору, т.к. является цветом, разграничивающим модулируемые биты; данное ограничение установлено и для ручного выбора цветов;

6) строка ввода, в которую можно ввести значение длительности, в течение которой будет генерироваться изображение с цветовой заливкой, используемой для модуляции бита «0» битовой последовательности;

7) строка ввода, в которую можно ввести значение длительности, в течение которой будет генерироваться изображение с цветовой заливкой, используемой для модуляции бита «1» битовой последовательности;

8) кнопка «Случайно», при нажатии на которую строки для ввода значений длительностей заполняются случайными значениями с существующими ограничениями, а именно: длительности должны быть в диапазоне 0.5-5 сек; минимальная разница между длительностями должна быть 1.0 сек; данные ограничения установлены и для ручного ввода значений длительностей;

9) кнопка «Ок», при нажатии на которую (рис. 3):

– выбранные цвета проверяются на удовлетворение ограничению (не являются белым цветом);

– при удовлетворении ограничению цвета сохраняются в память программы;

– значения длительностей проверяются на удовлетворение ограничениям;

– при удовлетворении ограничениям значения длительностей сохраняются в память программы;

– происходит запись действия о выбранных характеристиках тестового сигнала в лог;

– окно выбора характеристик тестового электромагнитного сигнала закрывается;

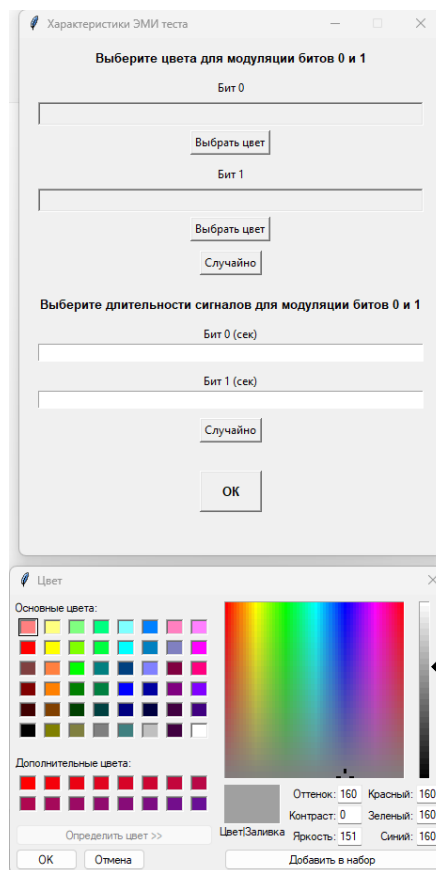


Рисунок 2. Стандартное окно цветовой палитры Windows [составлено авторами]

Figure 2. Standard Window Color Palette Windows [compiled by the authors]

– происходит модуляция (передача) битовой последовательности сигналом (вызывающим ЭМИ кабеля VGA) с выбранными характеристиками;

– происходит запись действия об отправке битовой последовательности в лог;

– после передачи из памяти программы удаляются значения характеристик тестового электромагнитного сигнала;

– после передачи из памяти программы удаляется значение передаваемой тестовой последовательности;

– после передачи из памяти программы удаляется значение преобразованной битовой последовательности;

– происходит запись действия об очистке переменной в лог;

– после передачи разблокируются кнопки «Ввод», «Очистить переменную», «Очистить лог»;

– происходит запись действия о разблокировке кнопок в лог.

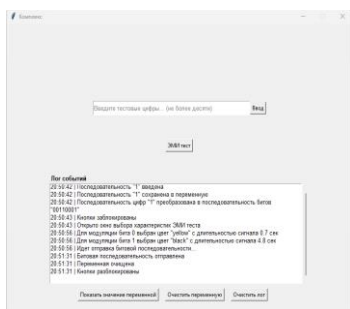


Рисунок 3. Результат нажатия на кнопку «Ок»
[составлено авторами]

Figure 3. The result of clicking on the «Ok» button
[compiled by the authors]

При закрытии окна выбора характеристик тестового электромагнитного сигнала происходит следующее:

- 1) происходит запись действия о закрытии окна в лог;
- 2) разблокируются кнопки «Ввод», «Очистить переменную», «Очистить лог»;
- 3) происходит запись действия о разблокировке кнопок в лог.

Прерывание происходящей передачи тестового электромагнитного сигнала.

Во время передачи тестового электромагнитного сигнала при нажатии на клавишу «Esc»:

- 1) происходит прерывание передачи тестового электромагнитного сигнала;
- 2) происходит запись действия о прерывании передачи в лог;
- 3) из памяти программы удаляются значения характеристик тестового электромагнитного сигнала;
- 4) из памяти программы удаляется значение передаваемой тестовой последовательности;
- 5) из памяти программы удаляется значение преобразованной битовой последовательности;
- 6) происходит запись действия об очистке переменной в лог;
- 7) разблокируются кнопки «Ввод», «Очистить переменную», «Очистить лог»;
- 8) происходит запись действия о разблокировке кнопок в лог.

Ошибки, которые могут возникнуть в окне выбора характеристик тестового электромагнитного сигнала:

- при нажатии кнопки «Ок» не выбран хотя бы один цвет;

- при нажатии кнопки «Ок» не соблюдается условие неравенства выбранных цветов белому цвету;

- при нажатии кнопки «Ок» на заполненную хотя бы одна строка для ввода значения длительности;

- при нажатии кнопки «Ок» не соблюдается условие нахождения введенного значения длительности в допустимом диапазоне значений длительностей;

- при нажатии кнопки «Ок» не соблюдается условие минимальной разницы введенных значений длительностей.

Результаты

Результаты измерений и расчетов приведены в таблице 1. На рисунке 4 в качестве примера приведена спектрограмма ЭМИ кабеля VGA при обработке видеосистемой СВТ одного из цветов, приведенного в таблице 1.

Обсуждение

Исходя из рассчитанных значений U_c цветам распределены условные места в соответствии с их эффективностью применения источником сигнала в ТКУИ за счет ЭМИ кабеля VGA (чем больше U_c , тем лучше место).

Заключение

В рамках данной работы была успешно решена актуальная задача по разработке СПО, которое не только организует источник сигнала в ТКУИ за счет ЭМИ кабеля видеосистемы, но и позволяет выявить параметры, вызывающие наибольшее напряжение сигнала кабеля видеосистемы, используемое при модуляции передаваемой информации в ТКУИ. Используя разработанное СПО, были выявлены параметры, вызывающие наибольшее напряжение сигнала кабеля VGA, используемого при модуляции передаваемой информации в ТКУИ – проведено исследование зависимости напряжения сигнала от цветовых характеристик изображений, обрабатываемых видеосистемой СВТ. Это обеспечивает переход от качественной демонстрации угрозы к ее строгому количественному анализу.

Таблица 1. Результаты измерений значений U_{c+n} и расчетов значений U_c для различных цветов [составлено авторами]

Table 1. Results of measurements of values U_{c+n} and calculations of values U_c for different colors [compiled by the authors]

| Распределение эффективности цветов по местам | Название цвета | Код RGB цвета | U_{c+n} (дБ(мВ)) | U_c (дБ(мВ)) |
|--|--------------------|---------------|--------------------|----------------|
| 1 | Loulou | 64, 0, 64 | -34,94 | -39,96 |
| 2 | Mint Green | 128,255,128 | -35 | -39,99 |
| 3 | Magenta | 255,0,255 | -35,16 | -40,08 |
| 4 | Teal | 0,128,128 | -35,36 | -40,19 |
| 5 | Rose | 128,0,64 | -35,42 | -40,23 |
| 6 | Silver | 192,192,192 | -35,43 | -40,23 |
| 7 | Rich Black | 0,64,64 | -35,44 | -40,24 |
| 8 | Black | 0,0,0 | -35,54 | -40,29 |
| 9 | Blue | 0,0,255 | -35,93 | -40,52 |
| 10 | Purple | 128,0,128 | -36,05 | -40,59 |
| 11 | Duke Blue | 0,0,160 | -36,19 | -40,67 |
| 12 | Olive | 128,128,0 | -36,30 | -40,74 |
| 13 | Dark cerulean | 0,64,128 | -36,31 | -40,75 |
| 14 | Faded Jade | 64,128,128 | -36,43 | -40,82 |
| 15 | Old Moss Green | 128,128,64 | -36,44 | -40,83 |
| 16 | Orange | 255,128,0 | -36,54 | -40,89 |
| 17 | Kingfisher Daisy | 64,0,128 | -36,56 | -40,90 |
| 18 | Navy Blue | 0,0,128 | -36,57 | -40,91 |
| 19 | Cinnamon | 128,64,0 | -36,63 | -40,95 |
| 20 | Gray | 128,128,0 | -36,94 | -41,14 |
| 21 | Mango Tango | 255,128,64 | -36,97 | -41,16 |
| 22 | Chartreuse | 128,255,0 | -37,18 | -41,30 |
| 23 | Siren | 128,0,64 | -37,71 | -41,67 |
| 24 | Lotus | 128,64,64 | -37,80 | -41,73 |
| 25 | Stratos | 0,0,64 | -37,80 | -41,73 |
| 26 | Ao | 0,128,0 | -37,82 | -41,75 |
| 27 | Dartmouth Green | 0,128,64 | -38,06 | -41,92 |
| 28 | Maroon | 128,0,0 | -39,06 | -42,71 |
| 29 | Spring Green | 1,255,128 | -39,53 | -43,13 |
| 30 | Burnt Maroon | 64,0,0 | -39,59 | -43,18 |
| 31 | Light Coral | 255,128,128 | -39,75 | -43,33 |
| 32 | Fuchsia Pink | 255,128,255 | -39,80 | -43,38 |
| 33 | Deep Fir | 0,64,0 | -40,74 | -44,36 |
| 34 | Yellow | 255,255,0 | -40,78 | -44,41 |
| 35 | Violet | 128,0,255 | -41,60 | -45,45 |
| 36 | Azure | 0,128,255 | -41,88 | -45,85 |
| 37 | Malachite | 1,255,64 | -42,05 | -46,12 |
| 38 | Green | 1,255,0 | -42,19 | -46,35 |
| 39 | Dolly | 255,255,128 | -42,28 | -46,50 |
| 40 | Persian Pink | 255,128,192 | -42,43 | -46,76 |
| 41 | Electric | 128,255,255 | -42,58 | -47,04 |
| 42 | Lochmara | 0,128,192 | -42,83 | -47,54 |
| 43 | Aqua | 1,255,255 | -43,12 | -48,20 |
| 44 | Dark Imperial Blue | 128,128,255 | -43,78 | -50,14 |
| 45 | Red | 255,0,0 | -44,41 | -53,31 |

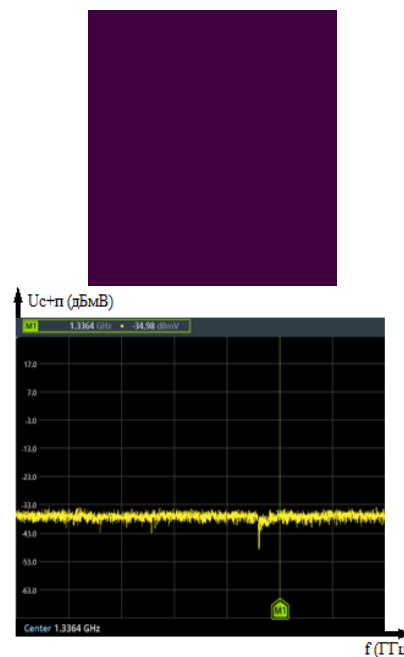


Рисунок 4. Цвет Loulou (#400040, rgb(64,0,64)) и спектрограмма уровня его ЭМИ [составлено авторами]

Figure 4. Loulou color (#400040, rgb(64,0,64)) and its EMR level spectrogram [compiled by the authors]

Разработанное СПО открывает следующие возможности в практике обеспечения ядерной безопасности, которые напрямую способствуют повышению ее уровня:

- обеспечение безопасности объектов КИИ: разработанное СПО является ключевым инструментом для аттестации защищенности объектов КИИ. Оно позволяет проводить натурные испытания и оценивать реальную эффективность мер по защите помещений от утечки информации по электромагнитному каналу;

- разработка и сертификация средств защиты информации: СПО может быть использовано для разработки новых и совершенствования существующих пассивных и активных средств защиты информации, а также для проведения их сертификационных испытаний;

- оценка рисков и моделирование угроз: СПО позволяет моделировать сценарии перехвата информации злоумышленником, определять расстояния перехвата и оценивать возможность восстановления конкретной информации. Это необходимо для построения моделей угроз и выработки превентивных мер защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Казаков А.А. Разработка предложений для критерия оценки эффективности защиты информации от утечки по техническим каналам. Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XV Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. Саров. 2021. С. 66–67. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46354027&ysclid=mioau2p55u420099955> (дата обращения: 27.08.2025).

Kazakov A.A. Development of proposals for a criterion for assessing the effectiveness of information protection against leakage through technical channels. Mathematics and Mathematical Modeling. Collection of materials of the XV All-Russian Youth Scientific and Innovative School. Sarov. 2021. P. 66–67. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46354027&ysclid=mioau2p55u420099955> (accessed: 27.08.2025).

2. Евстифеев А.А., Ерошев В.И., Казаков А.А., Николаев Д.Б. Исследование возможности создания программно формируемых технических каналов утечки информации. XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки). Материалы докладов. Нижний Новгород. 2018. С. 85. Режим доступа: http://sessiann.ru/files/24_teh_est_mat.pdf?ysclid=miobhcmctcf746528324 (дата обращения: 27.08.2025).

Evstifeev A.A., Eroshev V.I., Kazakov A.A., Nikolaev D.B. Research of the Possibility of Creating Software-Formed Technical Information Leakage Channels. XXIII Nizhny Novgorod Session of Young Scientists (Technical, Natural, and Mathematical Sciences). Proceedings of the Sessions. Nizhny Novgorod. 2018. P. 85. (In Russ.). Available at: http://sessiann.ru/files/24_teh_est_mat.pdf?ysclid=miobhcmctcf746528324 (accessed: 27.08.2025).

3. Груздев С.В., Чернышов С.А., Николаев Д.Б. Особенности построения программно-аппаратного комплекса для оценки возможности утечки информации по перспективным техническим каналам. Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XVI Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. Саров. 2022. С. 45–46. Режим доступа: <https://elibrary.ru/dpggfj?ysclid=miobidvv8n687812234> (дата обращения: 27.08.2025).

Gruzdev S.V., Chernyshov S.A., Nikolaev D.B. Features of building a software and hardware complex for assessing the possibility of information leakage through promising technical channels. Mathematics and Mathematical Modeling. Collection of Materials of the XVI All-Russian Youth Scientific and Innovation School. Sarov. 2022. P. 45–46. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/dpggfj?ysclid=miobidvv8n687812234> (accessed: 27.08.2025).

4. Евстифеев А.А., Ерошев В.И., Запонов Э.В., Казаков А.А., Николаев Д.Б. Инструментальный контроль защищенности информации от утечки по каналу побочных электромагнитных излучений и наводок: учебное пособие. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2024. 169 с. Режим доступа: <https://www.iprbookshop.ru/epd-reader?publicationId=148474> (дата обращения: 27.08.2025).

Evstifeev A.A., Eroshev V.I., Zaponov E.V., Kazakov A.A., Nikolaev D.B. Instrumental Control of Information Security Against Leakage via Side Electromagnetic Emissions and Inductances: Study Guide. Sarov: RFNC-VNIIEF. 2024. 169 p. (In Russ.). Available at: <https://www.iprbookshop.ru/epd-reader?publicationId=148474> (accessed: 27.08.2025).

5. Грибов Н.А., Евстифеев А.А. Обзор атак по побочным каналам. Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. Саров. 2024. С. 14–15. Режим доступа <https://openrepository.mephi.ru/handle/123456789/15714> (дата обращения: 27.08.2025).

Gribov N.A., Evstifeev A.A. Overview of side-channel attacks. Mathematics and Mathematical Modeling. Collection of materials of the XVIII All-Russian Youth Scientific and Innovative School. Sarov. 2024. P. 14–15. (In Russ.). Available at: <https://openrepository.mephi.ru/handle/123456789/15714> (accessed: 27.08.2025).

6. Грибов Н.А., Евстифеев А.А., Корепанов А.В. Разработка классификаций атак по виду используемого побочного канала. Математика и математическое моделирование. Сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. Саров. 2024. С. 13–14. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68593281&pff=1> (дата обращения: 27.08.2025).

Gribov N.A., Evstifeev A.A., Korepanov A.V. Development of classifications of attacks by the type of side channel used. Mathematics and Mathematical Modeling. Collection of materials of the XVIII All-Russian Youth Scientific and Innovative School. Sarov. 2024. P. 13–14. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68593281&pff=1> (accessed: 27.08.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Красильников Б.А. – программная реализация и тестирование специального программного обеспечения; исследование электромагнитного излучения кабеля VGA в зависимости от цвета изображения, обрабатываемого видеосистемой средства вычислительной техники; анализ результатов исследования;

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Krasilnikov B.A. – software implementation and testing of special software; investigation of electromagnetic radiation of VGA cable depending on image colour processed by video system of computer equipment; analysis of study results;

Евстифеев А.А. – разработка графического интерфейса специального программного обеспечения; подбор методов исследования; обработка и систематизация результатов работы;

Николаев Д.Б. – методическая и организационная поддержка при разработке плана работы и при проведении работы; контроль качества выполняемой работы; документирование результатов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Финансирование за счет средств Саровского физико-технического института, филиала «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (СарФТИ НИЯУ МИФИ).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Борис Андреевич Красильников, заведующий лабораторией безопасности информационных и технических систем СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0002-7558-8286>

e-mail: Krasilnikov.Boris.Work@yandex.ru

Александр Александрович Евстифеев, кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики и электроники СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0001-0465-1607>

e-mail: aaevstifeev@rambler.ru

Дмитрий Борисович Николаев, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиофизики и электроники СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-4618-1022>

e-mail: dim010307@yandex.ru

Evstifeev A.A. – development of a graphical interface for special software; selection of research methods; processing and systematization of work results;

Nikolaev D.B. – methodological and organizational support in the development of the work plan and during the work; quality control of the work performed; documenting the results.

FUNDING:

Financing from Sarov Institute of Physics and Technology the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI».

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Boris A. Krasilnikov, Head of the Information and Technical Systems Security Laboratory, Sarov Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0002-7558-8286>

e-mail: Krasilnikov.Boris.Work@yandex.ru

Alexander A. Evstifeev, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Department of Radiophysics and Electronics, Sarov Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0001-0465-1607>

e-mail: aaevstifeev@rambler.ru

Dmitry B. Nikolaev, Dr. Sci. (Engin.), Associate Professor, Head of the Department of Radiophysics and Electronics, Sarov Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-4618-1022>

e-mail: dim010307@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 02.10.2025

После доработки / Revision 03.12.2025

Принята к публикации / Accepted 09.12.2025

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-2025-04-10>

УДК [332.1+331.108]:621.039

EDN VYDNMU


Оригинальная статья / Original paper



Региональная модель кадрового обеспечения компаний
топливно-энергетического комплекса

Н.К. Савельева , А.А. Созинова , М.В. Макарова  

Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация

 usr21824@vyatsu.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема кадрового обеспечения электроэнергетических компаний, на основе отраслевых потребностей, а также поиск решений преодоления дефицита кадров на примере Группы «ПАО Россети», партнера государственной корпорации «Росатом» в области ИТ-разработок. Целью научно-исследовательской работы является разработка релевантных механизмов кадрового обеспечения компаний электроэнергетики на региональном уровне. Научная новизна исследования сводится к следующим положениям: предложена модель кадрового обеспечения электроэнергетической компании с учетом региональной дифференциации, включающая внутренние и внешние факторы. **Методология и методы.** Для исследования тенденций кадрового обеспечения использовались общенаучные методы (теоретический анализ научных трудов, эмпирический, логический, метод компаративного анализа и моделирования). Проведен обзор публикаций, который позволил определить предметную область исследовательской работы. **Результаты.** В качестве решения проблемы укомплектованности электроэнергетических компаний, на основе отраслевых потребностей, предложена региональная модель кадрового обеспечения. Включающая внешние (инфраструктурные) и внутренние факторы. Внешние факторы представлены образовательной инфраструктурой и наличием работодателей - конкурентов. Внутренние факторы представлены наличием корпоративных учебных центров и управленческой, кадровой и социальной политикой компании. **Обсуждение.** Определены основные внутренние и внешние элементы региональной модели кадрового обеспечения электроэнергетической компании, обосновано наличие региональной дифференциации, свойственное для пространственного развития Российской Федерации. С целью подтверждения значимости внутреннего ориентира на сотрудников, проведен компаративный анализ нормативных актов в области социального партнерства.

Ключевые слова: электроэнергетика, кадровый дефицит, региональная модель кадрового обеспечения.


Для цитирования: Савельева Н.К., Созинова А.А., Макарова М.В. Региональная модель кадрового обеспечения компаний топливно-энергетического комплекса. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):94–106. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-10>

For citation: Savelieva N.K., Sozinova A.A., Makarova M.V. Regional model of staffing for fuel and energy companies. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):94–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-10>

Regional model of staffing for fuel and energy companies

Nadezhda K. Savelieva , Anastasia A. Sozinova , Maria V. Makarova  

Vyatka State University, Kirov, Russia

 usr21824@vyatsu.ru

Abstract. The article considers the problem of staffing electric power companies based on industry needs, and searches for solutions to overcome the personnel shortage using the example of PJSC «Rosseti» Group, a partner of the state

corporation Rosatom in the field of IT developments. The objective of the research work is to develop relevant mechanisms for staffing electric power companies at the regional level. The scientific novelty of the study is reduced to the following provisions: a model of staffing of an electric power company is proposed, taking into account regional differentiation, incorporating internal and external factors. **Methodology and methods.** To study the trends in staffing, general scientific methods are used (theoretical analysis of scientific papers, empirical, logical, comparative analysis and modeling). A review of publications is conducted, which allowed us to determine the subject area of the research work. **Results.** As a solution to the staffing problem of electric power companies, based on industry needs, a regional model of staffing is proposed. It includes external (infrastructure) and internal factors. External factors include educational infrastructure and the presence of competing employers. Internal factors include the availability of corporate training centers and the company's management, HR, and social policies. Discussion. The key internal and external elements of the regional staffing model for an electric power company are identified, and the existence of regional differentiation, characteristic of the spatial development of the Russian Federation, is substantiated. To confirm the importance of an internal focus on employees, a comparative analysis of regulatory acts in the field of social partnership is conducted.

Keywords: electric power industry, personnel shortage, regional model of personnel provision.

Введение

В апреле 2025 г. Премьер-министр М. Мишустин подписал документ об утверждении обновленной «Энергетической стратегии Российской Федерации до 2050 года» (далее по тексту Стратегия 2050) [1]. Стратегия 2050 разработана по прямому указанию Президента В.В. Путина и является межотраслевым стратегическим документом. Обновление документа обоснованно структурной трансформацией глобального энергетического рынка, геополитическими вызовами, а также долгосрочными трендами, связанными с ростом потребления ресурсов топливно-энергетического комплекса (далее ТЭК). Стратегия 2050 ставит целью сохранение положения Российской Федерации в качестве лидера на глобальном рынке традиционных отраслей ТЭК и адаптацию к совершенно новым мировым вызовам. В текущих условиях критически важно модернизировать инфраструктурные объекты ТЭК, переориентировать логистические маршруты на перспективные рынки (на пример, рынки БРИКС и Глобального Юга), поддерживая высокий уровень конкурентоспособности за счет развития энергосистем и экономики предложения. Что касается конкретно электроэнергетики, остро стоят ставшие уже «традиционными» проблемы: модернизации инфраструктуры, несоответствие технических параметров энергетических объектов современным требованиям, изношенность сетей. Необходимо продолжать внедрение цифровых технологий, инновационных операционных инструментов

и бизнес-моделей, внедрять искусственный интеллект в некоторые бизнес-процессы компаний, а также развивать и поддерживать научные исследования в области развития технологий новой энергетики.

Поставленные амбициозные задачи невозможно осуществить без совершенствования подхода к кадровому обеспечению ТЭК в целом, и электроэнергетической отрасли в частности, качественным квалифицированным персоналом, с учетом реальных отраслевых потребностей к квалификации, уровню образования и с учетом диспропорций в категориальном составе персонала отраслевых компаний. Учитывая вышеизложенное проблемы анализа адровой обеспеченности компаний электроэнергетической отрасли, на основе отраслевых потребностей, а также поиск решений преодоления дефицита кадров, становятся актуальной научной задачей, требующей дополнительной теоретико-методической проработки.

Материалы и методы

Для исследования вопросов кадровой обеспеченности компаний электроэнергетической отрасли использовались общенаучные методы (теоретический анализ научных трудов, эмпирический, логический, метод компаративного анализа и моделирования). Проведен обзор публикаций, который позволил определить предметную область исследовательской работы.

Анализ научной литературы по заявленной тематике показал высокую степень разработки проблемы. Среди научных трудов

последних лет, раскрывающих вопросы функционирования отраслей ТЭК Российской Федерации в новых экономических реалиях целесообразно выделить работы научного коллектива ВШЭ [2], Захаровой О.Д., Харитоновой Н.А. [3], Шелкуновой Т.Г. [4], Адрианова В.В. [5], Журавлева А.С. [6] и других.

Вопросы кадрового обеспечения в различных отраслях ТЭК являются областью научных интересов Бондаренко А., Головки М.В., Руденко В.А. и др. [8], Поповой Т.С., Волгиной С.В., Попова А.А., Залиско Т.А. [10], Савельевой Н.К., Созиновой А.А., Макаровой М.В. [10], Жданеева О.В. [11] и других.

Методики определения потребности в кадрах в различных отраслях национальной экономики рассмотрены в работах Антропова В.А. [12], Бакановой Ю.А. [13], Тюнниковой Ю.С., Халадова Т.Ю. и др. [14], Митяков Е.С. [15] и др. Обзору подходов к прогнозированию потребностей экономики в кадрах посвящены работы Гуртова В.А. и Питухина Е.А. [16]. Большой пласт научных работ посвящен особенностям подготовки кадров для электроэнергетики [17–21]. Тематика измерения и оценки потребности в кадрах в отраслях ТЭК является специфичной и не в полной мере разработанной науч-

ной проблемой. Следует отметить работу Будзинской О.В., посвященную построению модели прогнозирования потребности в квалифицированных кадрах в нефтегазовой отрасли с учетом отраслевых факторов [22]. Возможные решения проблемы кадрового дефицита в энергетике рассмотрены в коллективной работе [23]. Таким образом, можно констатировать недостаточное поле научных публикаций по тематике кадровой обеспеченности электроэнергетики, с точки зрения потребностей отрасли.

Результаты и обсуждения

Электроэнергетика остается основной системообразующей отраслью народного хозяйства, от непрерывной работы которой зависят прочие отрасли. В данном исследовании в качестве электроэнергетической компании рассмотрена Группа «ПАО Россети». Группа «ПАО Россети» – один из крупнейших в мире электросетевых холдингов, обеспечивающий электроснабжение потребителей в 82 регионах России, по сетям Группы «ПАО Россети» передается более 80% всей вырабатываемой в стране электроэнергии. Бизнес-модель Группы «ПАО Россети» в области передачи электроэнергии к конечному потребителю представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Бизнес-модель деятельности по передаче электроэнергии Группы «ПАО Россети»
[составлено авторами]

Figure 1. Business model of the electricity transmission activities of the PJSC «Rosseti» Group
[compiled by the authors]

Такая фундаментальная нагрузка и ответственность требует, во-первых, постоянной укомплектованности энергетических компаний персоналом, во-вторых, взаимодействия с учебными заведениями по подготовке специалистов, в-третьих, развитие системы профессиональной переподготовки персонала, в-четвертых, поиск потенциальных работников требуемой квалификации в смежных компаниях. Вышеизложенные факторы легли в основу понимания нами региональной модели кадрового обеспечения электроэнергетической компании. По замыслу авторов элементы модели разделены на две

группы: внутренние и внешние. По нашему мнению, внутренние факторы формируются исходя из управленческой политики внутри компании, в частности это привлекательность работодателя с точки зрения уровня средней заработной платы, социальных гарантий, карьерных треков и корпоративного обучения. Внешние факторы формируются под влиянием региональной инфраструктуры.

Структура Модели (рис. 2) имеет общие контуры, но меняется, с учетом существующей дифференциации регионов присутствия конкретной компании.

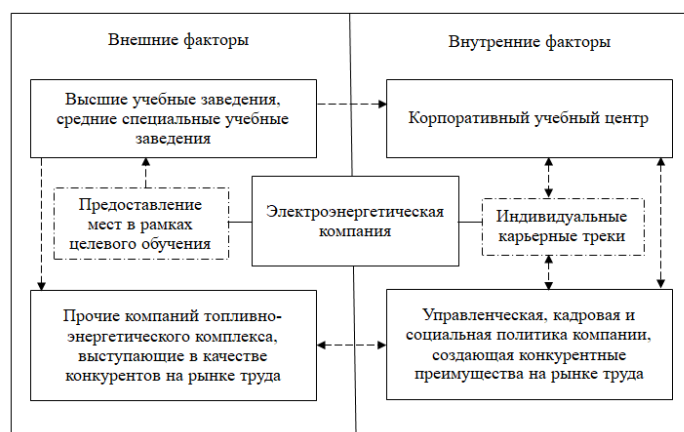


Рисунок 2. Модель кадрового обеспечения электроэнергетической компании [составлено авторами]
Figure 2. Human Resources Model for an Electric Power Company [compiled by the authors]

Традиционно для России, региональное неравенство проявляется и в описанных параметрах модели. Можно выделить основные региональные различия, относящиеся к внешним элементам модели:

1. количество учебных заведений средне-специального и высшего образования, осуществляющих подготовку по ключевым направлениям, которые требуются для устройства в электроэнергетическую компанию;

2. наличие Корпоративного учебного центра в регионе присутствия, осуществляющего обучение и переподготовку специалистов в области электроэнергетики (Пример: в настоящий момент в компании Группы «ПАО Россети» функционирует 30 лицензированных образовательных организаций). Такие центры являются базовыми при подготовке оперативного и производственного персона-

ла под нужды всех филиалов Группы «ПАО Россети»;

3. количество прочих компаний топливно-энергетического комплекса (ТЭК включает нефтяную, газовую, нефтегазохимическую, угольную отрасли, электроэнергетику и теплоснабжение), или смежного вида деятельности (генерирующие компании и сбытовые организации (пример: ПАО Тплус), прочие территориальные сетевые организации, филиалы других компаний входящих в Единую энергетическую систему России и т.д.).

Отдельно рассмотрим элемент корпоративных учебных центров. Корпоративные учебные центры выступают главным звеном в системе профессиональной подготовки сотрудников Группы «ПАО Россети». Образовательная инфраструктура представлена масштабной сетью по всей Российской Федерации, в которую входят 30 лицензиро-

ванных учебных центров. При этом система включает 9 филиалов, обеспечивающих географическую доступность обучения персонала компании. В контуре компании Группы «ПАО Россети» функционирует 30 учебных центров во всех федеральных округах (рис. 3).



| Федеральный округ | Количество УЦ | Цвет |
|-------------------|---------------|---------|
| Дальневосточный | 2 | Orange |
| Приволжский | 7 | Grey |
| Северо-Западный | 4 | Blue |
| Северо-Кавказский | 2 | Cyan |
| Сибирский | 2 | Green |
| Уральский | 3 | Magenta |
| Центральный | 9 | Yellow |
| Южный | 2 | Yellow |

Рисунок 3. Внутренняя образовательная инфраструктура Группы «ПАО Россети»
[составлено авторами]

Figure 3. Internal educational infrastructure of the PJSC «Rosseti» Group
[compiled by the authors]

Больше всего учебных центров сосредоточено в Центральном и Приволжском федеральных округах. Следует отметить наличие взаимосвязи внешних и внутренних элементов данной модели. Так, количество образовательных учреждений связано с наличием, или отсутствием корпоративного учебного центра: если в регионе в достаточном количестве представлены учебные заведения, которые осуществляют подготовку специалистов различных категорий для электроэнергетики, следует ожидать ежегодного притока кандидатов на существующие вакансии. В этом случае, наличие учебного центра ускорит процесс адаптации новых работников и допуска к самостоятельной работе, миграции персонала внутри компании, переподготовки собственного персонала для замещения должностей исходя их укомплектованности компании, а также в связи со сменой карьерного вектора, или повышения квалификации в случае перехода в рамках категорий персонала.

Что касается региональных различий во внутренних элементах модели, основным является уровень средней заработной платы (СЗП) в компании, в сопоставлении с уровнем СЗП по региону в целом, по компаниям соответствующего ОКВЭД2. Анализ среднемесячной номинальной начисленной заработной платы по виду экономической деятельности 35.1. «Производство, передача и распределение электроэнергии» в разрезе федеральных округов за 2021-2024 гг. представлен на рисунке 4.

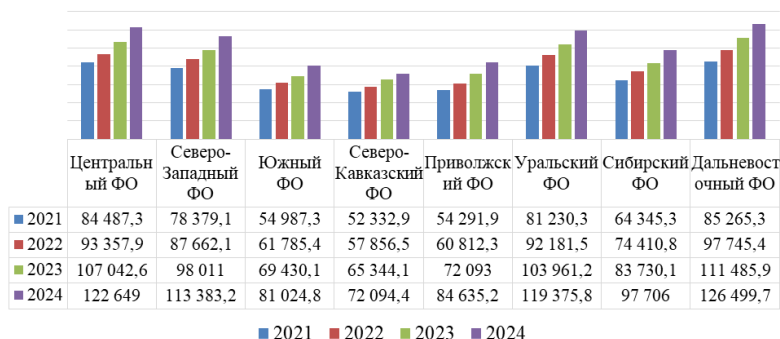


Рисунок 4. Среднемесячная номинальная начисленная заработная плата по виду экономической деятельности «Производство, передача и распределение электроэнергии» в разрезе федеральных округов за 2021-2024 гг.
[составлено авторами по данным ЕМИСС]

Figure 4. Average monthly nominal accrued wages by economic activity type «Production, transmission and distribution of electricity» by federal districts for 2021-2024 [compiled by the authors based on EMISS data]

Высокая конкуренция за персонал на рынке труда, требует от менеджмента поиска инновационных или адаптации классических подходов к подбору и удержанию персонала [24]. Соответственно, компании будут стараться устанавливать конкурентный уровень заработной платы, как первостепенный фактор, которым руководствуются соискатели при подборе места работы. Электроэнергетические компании обеспечивают стабильный рост заработных плат работников. Наиболее высокая заработная плата в 2024 г. установлена в компаниях обслуживающих территории Центрального и Дальневосточного федеральных округов. Рост заработной платы в 2024 г. относительно 2023 г. составил 14,6 % и 13,5 % соответственно.

Кроме того, наличие конкуренции стимулирует развитие так социальных гарантий работодателя и дополнительных преимуществ. Сюда можно отнести все аспекты Коллективного договора компании, наличие медицинской страховки, покрытие жилищных и топливных расходов, индивидуальный подход при составлении прозрачных карьерных треков и др.

В электроэнергетике, одним из основополагающих документов в области прав и законных интересов работодателей и работников, в том числе с учетом системы государственного регулирования и контроля, является Отраслевое тарифное соглашение (далее ОТС). Актуальное ОТС утверждено Общероссийским отраслевым объединением работодателей электроэнергетики «Энергетическая работодателская ассоциация России», Общественной организацией «Всероссийский Электропрофсоюз» 25.12.2024¹. ОТС призвано устанавливать минимальный отраслевой уровень гарантий работников компаний, участников ОТС.

Кроме того, электроэнергетические компании Группы «ПАО Россети» имеют свои локальные коллективные договоры, в которых устанавливаются социальные гарантии сотрудников. При этом локальные коллективные договоры не должны противоречить ОТС, или устанавливать общие условия оплаты труда, основные гарантии, компенсации и льготы работникам ниже, чем предусмотрено ОТС. В феврале 2025 г. состоялось подписание новых коллективных договоров ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье», что послужило поводом для проведения анализа.

Проведен компаративный анализ текста актуального «Отраслевого тарифного соглашения в электроэнергетике Российской Федерации на 2025–2027 годы» и «Коллективного договора ПАО «Россети Центр и Приволжье на 2025–2027 годы»² с точки зрения установленных мер поддержки работников компаний (табл.1).

Компаративный анализ документов регламентирующих социальные гарантии работников электроэнергетических компаний показал, что Коллективный договор Группы ПАО «Россети» содержит более широкий спектр гарантий и больший размер финансовых выплат. Коллективный договор – выступает существенным конкурентным преимуществом компании, способствующим снижению текучести персонала. Наличие такого широкого спектра социальных гарантий обосновывает позиционирование Группы «ПАО Россети» в качестве социально-ответственной компании, развивающей институты социального партнерства и достойного труда.

¹ Отраслевое тарифное соглашение в электроэнергетике Российской Федерации на 2025–2027 годы (утв. Общероссийским отраслевым объединением работодателей электроэнергетики «Энергетическая работодателская ассоциация России», Общественной организацией «Всероссийский Электропрофсоюз» 25.12.2024). Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=486965&ysclid=miwvck0r8r906902401> (дата обращения: 14.10.2025).

² Коллективный договор ПАО «Россети Центр и Приволжье». www.mrsk-cp.ru; 2025. Режим доступа: <https://mrsk-cp.ru/upload/000/New%20Folder/Коллективный%20договор%20ПАО%20Россети%20Центр%20и%20Приволжье%20на%202025-2027гг.pdf> (дата обращения: 14.10.2025).

Таблица 1. Компаративный анализ документов в области социальных гарантий работников электроэнергетики [составлено авторами]

Table 1. Comparative analysis of documents on social guarantees for power industry employees [compiled by the authors]

| Параметр | Отраслевое тарифное соглашение в электроэнергетике Российской Федерации на 2025–2027 годы | Коллективного договора ПАО «Россети Центр и Приволжье» на 2025–2027 годы |
|---|--|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Рабочее время и время отдыха | | |
| Дополнительные оплачиваемые дни отдыха | <ul style="list-style-type: none"> • 1 рабочий день 1 сентября родителям школьников 1-4 класса. • 1 рабочий день отцу при рождении ребенка. • 1 рабочий день при вступлении в брак работника или его детей (во всех случаях, если брак заключается впервые); • 1 рабочий день в случае смерти членов семьи. • 1 рабочий день на призыв на военную службу детей работника. • 1 рабочий день на прохождение «норм ГТО». | <ul style="list-style-type: none"> • 1 рабочий день 1 сентября родителям школьников 1-4 класса. • 1 рабочий день отцу при рождении ребенка. • 2 рабочих дня при вступлении в брак (если брак заключается впервые). • 1 рабочий день при вступлении в брак детей сотрудника. • 3 рабочих дня в случае смерти членов семьи. • Дополнительные дни, равные количеству детей, сотрудникам имеющим 3-х и более детей. |
| Наличие удаленного формата работы | В Организациях в соответствии с трудовым законодательством может предусматриваться выполнение отдельными категориями работников трудовой функции дистанционно – на постоянной основе или временно (в том числе периодически). | |
| Оплата труда | | |
| Минимальные размеры оплаты труда | Минимальная месячная тарифная ставки рабочих первого разряда – ММТС: - с 1 июля 2025 года 13 580 руб. - с 1 июля 2026 года 15 685 руб. - с 1 июля 2027 года ММТС устанавливается на следующий годичный период путем ее индексации на величину фактического индекса потребительских цен в Российской Федерации (на основании официальных данных Федеральной службы государственной статистики) за период с момента предыдущей индексации. | Базовый должностной оклад. - с 1 января 2025 года 20 000 руб. - с 1 июля 2025 года 24 000 руб. Далее ежегодно с 01 июля, исходя из финансовых возможностей работодателя, но не менее роста индекса потребительских цен в РФ. |
| Дополнительные льготы гарантии и компенсации | | |
| Единовременная материальная помощь | <ul style="list-style-type: none"> • гибели работника в результате несчастного случая, связанного с производством, не по вине работника – на каждого его иждивенца в размере годового заработка погибшего; • установления инвалидности в результате увечья по вине работодателя или профзаболевания в размерах: <ul style="list-style-type: none"> - инвалидам, имеющим 1-ю группу инвалидности, – не менее 75 (Семидесяти пяти) процентов годового заработка; - инвалидам, имеющим 2-ю группу инвалидности, – не менее 50 (Пятидесяти) процентов годового заработка; - инвалидам, имеющим 3-ю группу инвалидности, – не менее 30 (Тридцати) процентов годового заработка. | Аналогично ОТС и дополнительно: <ul style="list-style-type: none"> • ежемесячная выплата семье работника в результате гибели от несчастного случая на производстве, установления инвалидности в размере 6 600 руб. (до достижения детьми возраста 18 лет, при получении первого высшего образования до 23 лет на каждого ребенка). |

Продолжение таблицы 1
 Table 1 continuation

| 1 | 2 | 3 |
|--|---|---|
| Единовременная материальная помощь | в Единовременная материальная помощь: <ul style="list-style-type: none"> • в связи со смертью работника 12 359 руб.; • на организацию похорон ветеранов Организации 12 359 руб.; • работнику в связи со смертью его близких родственников – не менее 9 580 руб. | Единовременная материальная помощь <ul style="list-style-type: none"> • в связи со смертью работника 21 300 руб. • на организацию похорон неработающего пенсионера и неработающих инвалидов 13 100 руб. • работнику в связи со смертью близких родственников 12 000 руб. |
| | Доплату к страховой пенсии: <ul style="list-style-type: none"> а) по инвалидности – неработающему инвалиду, получившему инвалидность в результате увечья по вине работодателя или профессионального заболевания; б) по случаю потери кормильца – детям погибшего на производстве работника (несовершеннолетним детям, а также детям, обучающимся по очной форме в образовательных организациях всех типов и видов независимо от их организационно-правовой формы, до окончания ими такого обучения, но не дольше, чем до достижения ими возраста 23 лет). | Меры поддержки семей при осуществлении трудовых обязанностей в зоне проведения СВО и приграничных территориях ЛНР, ДНР: <ul style="list-style-type: none"> • 5 000 000 при смертельном исходе; • 3 000 000 при получении ранения. |
| | <ul style="list-style-type: none"> • при регистрации брака (если брак регистрируется впервые) – не менее 8 410 руб.; • при рождении (усыновлении, удочерении) ребенка – не менее 10 311 руб. | <ul style="list-style-type: none"> • при регистрации брака (если брак регистрируется впервые) – не менее 7 000 руб.; • при рождении (усыновлении, удочерении) ребенка – 30 000 руб.; ко дню рождения ребенка (1-3 года) 12 000 руб., если родитель находится в отпуске по уходу за ребенком. |
| Материальная помощь к ежегодному отпуску | Предоставление единовременной выплаты при уходе работника в ежегодный основной оплачиваемый отпуск. Выплата по данному основанию производится один раз в год в размере не менее ММТС. | Не содержится в коллективном договоре. Регламентируется Положением об оплате труда. Пропорционально стажу работы в организации. |
| Досуг детей | Частичную или полную компенсацию подтвержденных расходов работников: <ul style="list-style-type: none"> а) на содержание в дошкольных образовательных организациях детей работников, в семьях которых сумма дохода на одного члена семьи не превышает 8 775 (Восьми тысяч семисот семидесяти пяти) рублей; б) на содержание детей в дошкольных образовательных организациях семьям, имеющим троих и более детей; в) на приобретение путевок в оздоровительные лагеря детям работников, в семьях которых сумма дохода на одного члена семьи не превышает 8 775 (Восьми тысяч семисот семидесяти пяти) рублей; г) на содержание детей-инвалидов в дошкольных образовательных организациях и приобретение им путевок в оздоровительные лагеря. | Частичную или полную компенсацию подтвержденных расходов работников: <ul style="list-style-type: none"> а) на содержание в дошкольных образовательных организациях детей работников, в семьях которых сумма дохода на одного члена семьи не превышает 10 000руб.; в) на приобретение путевок в оздоровительные лагеря и санатории детям работников, в семьях которых сумма дохода на одного члена семьи не превышает 10 000 руб. Частичная компенсация расходов на оплату путевок детей сотрудников в детские оздоровительные лагеря или санатории – 16 000 руб. 1 раз в год. |

Продолжение таблицы 1
Table 1 continuation

| 1 | 2 | 3 |
|--|--|---|
| Добровольное медицинское страхование работников | + | + |
| Негосударственное пенсионное обеспечение работников | + | + |
| Выплаты работникам, удостоенным наградами (государственные, отраслевые, ведомственные и др.) | + | + |
| К юбилейным и праздничным датам | Не установлено. | Работникам, достигшим 50-летнего возраста (пропорционально стажу работы) На 8 марта и 23 февраля – 1 000 руб. Новогодние подарки детям до 14 лет – 1 200 руб. |
| Жилищная политика | Не установлено. Корпоративная поддержка в улучшении жилищных условий работников на условиях, определяемых непосредственно в Организациях. | В соответствии с положением о жилищной политике – компенсация найма жилья. |
| Молодые специалисты | При возобновлении трудовых отношений после прохождения военной службы в Вооруженных силах Российской Федерации по призыву, а также по мобилизации – в случае возобновления трудовых отношений в течение трех месяцев после окончания службы. | <ul style="list-style-type: none"> • Единовременная выплата работникам, впервые трудоустроившимся после окончания ВУЗа • При восстановлении на рабочем месте после прохождения срочной службы в течение 3 месяцев – 10 900 руб. |

В заключении отметим, что электросетевая компания со своей стороны так же оказывает влияние на региональную инфраструктуру. На пример, за счет создания объявления заказчика на платформе «Работа в России» о том, по каким направлениям подготовки и в каких вузах забронированы места в рамках целевого обучения. Таким образом компания реализует гарантированную подготовку специалистов по ключевым специальностям, исходя из производственной необходимости. Закрепляет обязательства компании-работодателя оказывать поддержку студенту и трудоустроить его по окончании обучения, а студента – трудоустроиться и работать в соответствии с полученной специальностью не менее 3-5 лет. Такая мера дает возможность прогнозировать укомплектованность персоналом, получать специалистов по ключевым направлениям подготовки, материально поддерживать и мотивировать молодое поколение к обучению в рамках всех образовательных программ энергетических специальностей в СУЗах и до уровня магистратуры в ВУЗах.

Второй способ влияния на региональную инфраструктуру носит скорее корпоративный характер. Это точечная работа кадровых служб по созданию индивидуальных карьерных треков. При формировании такого рода трека кадровый работник планирует обучение в Корпоративном карьерном центре, которое необходимо в рамках повышения разряда, смены категории инженерно-технического персонала или перехода.

Выводы

Подводя итог вышеизложенному, необходимо отметить значимость процесса кадрового обеспечения компаний электроэнергетики. Очевидно, что в рамках сложившегося кадрового дефицита и перераспределения трудовых ресурсов в оборонно-промышленный комплекс борьба за квалифицированных специалистов будет только усиливаться. Поэтому совершенствование модели кадрового обеспечения с учетом региональной специфики является актуальной задачей как инфраструктурного, так и внутрифирменного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12.04.2025 № 908-р. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013> (дата обращения: 20.09.2025).
Order of the Government of the Russian Federation of 12.04.2025 No. 908-r. (In Russ.). Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202504140013> (accessed: 20.09.2025).
2. Лихачев В.Л., Лихачева Е.В., Макаров И.А. и др Исследования будущего для долгосрочного развития топливно-энергетического комплекса. Под ред. Л. Н. Проскуряковой. Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2024. 50 с. 50 экз. ISBN 978-5-7598-2988-1 (в обл.). ISBN 978-5-7598-4048-0 (e-book). Режим доступа: <https://clck.ru/3QivAP> (дата обращения: 20.09.2025).
Likhachev V.L., Likhacheva E.V., Makarov I.A., et al. Research of the Future for Long-Term Development of the Fuel and Energy Complex. Report of the National Research University Higher School of Economics. Edited by L. N. Proskuryakova. National Research University Higher School of Economics. Moscow: Publishing House of the Higher School of Economics, 2024. 50 p. 50 copies. ISBN 978-5-7598-2988-1 (in red). ISBN 978-5-7598-4048-0 (e-book). (In Russ.). Available at: <https://clck.ru/3QivAP> (accessed: 20.09.2025).
3. Захарова О.Д., Харитоновна Н.А. ТЭК как драйвер экономического развития России: текущее состояние и перспективы. *Экономика промышленности*. 2020;13(2):257–268. Режим доступа: <https://ecoprom.misis.ru/jour/article/view/844/710> (дата обращения: 14.10. 2025).
Zakharova O.D., Kharitonova N.A. Fuel and energy complex as a driver of economic development of Russia: current state and prospects. *Industrial economics*. 2020;13(2):257–268. (In Russ.). Available at: <https://ecoprom.misis.ru/jour/article/view/844/710> (accessed: 14.10.2025).
4. Шелкунова Т.Г. Развитие топливно-энергетического комплекса РФ в условиях санкционных ограничений. *Гуманитарные и социально-экономические науки*. 2022;5(126):78–81. EDN: GGRWWH. <https://gsen.sfedu.ru/pdf/2022/05/025-rus.pdf>
Shelkunova T.G. Development of the fuel and energy complex of the Russian Federation in the context of sanctions restrictions. *Humanitarian and socio-economic sciences*. 2022;5(126):78–81. EDN: GGRWWH. (In Russ.). Available at: <https://gsen.sfedu.ru/pdf/2022/05/025-rus.pdf> (accessed: 20.09.2025).
5. Андрианов В. В. Трансформация энергетической политики России в эпоху санкций и энергоперехода *Вестник Института мировых цивилизаций*. 2022;13, 2(35):С. 1–18. EDN: ETANZZ. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-energeticheskoy-politiki-rossii-v-epohu-sanktsiy-i-energoperehoda?ysclid=miwtoq9qgw484646122> (дата обращения: 14 10.2025).
Andrianov V.V. Transformation of Russia's Energy Policy in the Era of Sanctions and Energy. *Bulletin of the Institute of World Civilizations*. 2022;13, 2(35):С. 1–18. EDN ETANZZ. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/transformatsiya-energeticheskoy-politiki-rossii-v-epohu-sanktsiy-i-energoperehoda?ysclid=miwtoq9qgw484646122> (accessed: 14.10.2025).
6. Журавлев А.С. Инвестиционное обеспечение процессов реструктуризации и развития топливно-энергетического комплекса. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2024;14(3-1):216–221. EDN: NZIMHR. Режим доступа: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-economy-2024-3/b21-zhuravlev.pdf> (дата обращения: 14.10.2025).
Zhuravlev A.S. Investment support for the processes of restructuring and development of the fuel and energy complex. *Economy: yesterday, today, tomorrow*. 2024;14(3-1):216–221. EDN: NZIMHR. (In Russ.). Available at: <http://www.publishing-vak.ru/file/archive-economy-2024-3/b21-zhuravlev.pdf> (accessed: 14.10.2025).
7. Бондаренко А. Проблемы кадрового обеспечения отраслей ТЭК. Энергетическая политика. 2022;11(177):6–15. EDN: BJVUDT. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_11177_6
Bondarenko A. Problems of staffing of fuel and energy complex industries. *Energy policy*. – 2022;11(177):6–15. EDN: BJVUDT. (In Russ.). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_11177_6
8. Головки М.В., Руденко В.А., Томилин С.А., Довбыш В.Е. Формирование и развитие человеческого потенциала предприятий атомного энергетического машиностроения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):73–86. EDN: WRXCSJ. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-07>
Golovko M.V., Rudenko V.A., Tomilin S.A., Dovbysh V.E. Formation and development of human potential of nuclear power engineering enterprises. *Global Nuclear Safety*. 2024;14(3):73–86. (In Russ.). EDN: WRXCSJ. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-07>
9. Попова Т.С., Волгина С.В., Попов А.А., Залиско Т.А. Значение надпрофессиональных компетенций студентов технических вузов при формировании отраслевого кадрового резерва ГК «Росатом». *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):101–108. EDN: YKHXXQ. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-09>
Popova T.S., Volgina S.V., Popov A.A., Zalisko T.A. The Importance of Transprofessional Competencies of Students of Technical Universities in the Formation of the Industry Personnel Reserve of Rosatom State Corporation. *Global Nuclear Safety*. 2024;14(3):101–108. (In Russ.). EDN: YKHXXQ. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-09>
10. Савельева Н.К., Созинова А.А., Макарова М.К. Укомплектованность кадрами электроэнергетики Российской Федерации в условиях цифровой трансформации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):91–102. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-08>

Savelieva N.K., Sozinova A.A., Makarova M.K. Staffing of the electric power industry of the Russian Federation in the context of digital transformation. *Global Nuclear Safety*. 2024; 14(2): 91–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-08>

11. Жданев О.В., Серегина А.А. Кадровое обеспечение топливно-энергетического комплекса Российской Федерации в условиях Энергоперехода. Москва: Издательский Дом «Инфра-М», 2022. 269 с. ISBN 978-5-16-017657-4. EDN: UNKXGA. Режим доступа: <https://elibrary.ru/unkxga?ysclid=miwu93bopb995219296> (дата обращения: 14.10.2025).

Zhdanev O.V., Seregina A.A. Personnel provision of the fuel and energy complex of the Russian Federation in the context of the Energy Transition. Moscow: Publishing House «Infra-M», 2022. 269 p. ISBN 978-5-16-017657-4. EDN: UNKXGA. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/unkxga?ysclid=miwu93bopb995219296> (accessed: 14.10.2025).

12. Антропов В.А., Паршина В.С. Методика определения потребности железных дорог в квалифицированных кадрах. *Экономика железных дорог*. 2008;3:59–67. EDN: PQEVB. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9944826&ysclid=miwudqjxqm747102728> (дата обращения: 14.10.2025).

Antropov V.A., Parshina V. S. Methodology for determining the need of railways for qualified personnel. *Economics of railways*. 2008;3:59–67. EDN: PQEVB. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9944826&ysclid=miwudqjxqm747102728> (accessed: 14.10.2025).

13. Баканова Ю. А. Методика прогнозирования потребности в кадрах для строительства: основы формирования. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2025;1(136):177–182. EDN: OZAFYT. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-177-182>

Bakanova Yu.A. Methodology for forecasting the need for personnel for construction: foundations of formation. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2025;1(136):177–182. EDN: OZAFYT. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-177-182>

14. Тюнников Ю.С., Халадов Х.А.С., Медведева Т.Ю. и др. Анализ методик прогнозирования потребности в педагогических кадрах региональных систем общего образования. *Вестник Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета*. 2023;5(177):187–224. EDN: VHQAGO. <https://doi.org/10.25588/CSPU.2023.177.5.010>

Tyunnikov Yu.S., Khaladov Kh.A.S., Medvedeva T.Yu. et al. Analysis of methods for forecasting the need for teaching staff in regional general education systems. *Bulletin of the South Ural State Humanitarian and Pedagogical University*. 2023;5(177):187–224. EDN: VHQAGO. <https://doi.org/10.25588/CSPU.2023.177.5.010>

15. Митяков Е. С., Лимасов А. М. Методика анализа потребности экономики России в it-специалистах. *Развитие и безопасность*. 2022;4(16):71–82. EDN: METSRN. https://doi.org/10.46960/2713-2633_2022_4_71

Mityakov E.S., Limasov A. M. Methodology for analyzing the needs of the Russian economy for IT specialists. *Development and Security*. 2022;4(16):71–82. EDN: METSRN. https://doi.org/10.46960/2713-2633_2022_4_71

16. Гуртов В.А., Питухин Е.А. Прогнозирование потребностей экономики в квалифицированных кадрах: обзор подходов и практик применения. *Университетское управление: практика и анализ*. 2017;21,4(110):130–161. EDN: ZWOUOJ. Режим доступа: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/62450/1/UM_2017_4_130-161.pdf?ysclid=miwupxebmn978831377 (дата обращения: 14.10.2025).

Gurtov V.A., Pitukhin E.A. Forecasting the economy's needs for qualified personnel: a review of approaches and application practices. *University management: practice and analysis*. 2017;21,4(110):130–161. EDN: ZWOUOJ. (In Russ.). Available at: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/62450/1/UM_2017_4_130-161.pdf?ysclid=miwupxebmn978831377 (accessed: 14.10.2025).

17. Булычев А.В. Электроэнергетика: ключевые научные достижения и задачи подготовки кадров. Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения : сборник научных трудов. Том Выпуск 11. Чебоксары : Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2015. С. 311–321. EDN: VAQXYZ. Режим доступа: <https://elibrary.ru/vaqxyz?ysclid=miwusnf9xh780731193> (дата обращения: 20.09.2025).

Bulychev, A. V. Electric power industry: key scientific achievements and tasks of personnel training. Regional energy and electrical engineering: problems and solutions: collection of scientific papers. Volume Issue 11. Cheboksary: Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, 2015. P. 311–321. EDN: VAQXYZ. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/vaqxyz?ysclid=miwusnf9xh780731193> (accessed: 20.09.2025).

18. Милованов Н.В. Кривицкий Д.Е., Ветров О.В. Некоторые проблемы в подготовке инженерных кадров в области электроэнергетики. Ресурсосбережение. Эффективность. Развитие: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Донецк, 29 октября 2021 года. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2021. С. 170–175. EDN: HVMDEC. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47943931&pff=1> (дата обращения: 20.09.2025).

Milovanov N.V., Krivitsky D.E., Vetrov O.V. Some problems in the training of engineering personnel in the field of electric power industry. Resource saving. Efficiency. Development: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Donetsk, October 29, 2021. Donetsk: Donetsk National Technical University, 2021. Pp. 170–175. EDN: HVMDEC. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47943931&pff=1> (accessed: 20.09.2025).

19. Абрамова Е.Ю., Коркин В.С., Лисин Е.М. Организационно-экономические модели подготовки кадров для глобальной экономики. Экономика и предпринимательство. 2016;3–1(68):838–846. EDN: VUEFLN. Режим доступа: <https://elibrary.ru/vuefln?ysclid=miwuyfskcf146878408> (дата обращения: 20.09.2025).

Abramova E.Yu., Korkin V.S., Lisin E.M. Organizational and economic models of personnel training for the global economy. Economy and entrepreneurship. 2016;3–1(68):838–846. EDN: VUEFLN. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/vuefln?ysclid=miwuyfskcf146878408> (accessed: 20.09.2025).

20. Евдокимов Е.В. Проблемы поиска квалифицированных кадров для предприятий электроэнергетики Ямало-Ненецкого автономного округа в современных условиях развития экономики России. Молодой ученый. 2022;39(434):42–43. EDN: VAXVHC. Режим доступа: <https://app-static-cdn.moluch.org/archive/434/> (дата обращения: 20.09.2025).

Evdokimov, E. V. Problems of finding qualified personnel for electric power enterprises of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug in the current conditions of economic development of Russia. *Young scientist*. 2022;39 (434):42–43. EDN: VAXVHC. (In Russ.). Available at: <https://app-static-cdn.moluch.org/archive/434/> (accessed: 20.09.2025).

21. Гаджибалаев Н. М., Гулиев З.А. Анализ проблем обучения персонала в электроэнергетике. Актуальные вопросы подготовки кадров по энергетическим специальностям: II-я Республиканская научная конференция, Сумгаит, 25–26 ноября 2021 года. Том 8. SUMQAYIT: Сумгаитский государственный университет, 2021. С. 52–54. EDN: EONXHG. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48486105&pff=1> (дата обращения: 14.10.2025).

Gadzhibalaev N.M., Guliyev Z.A. Analysis of problems of personnel training in the electric power industry. Current issues of personnel training in energy specialties: II-nd Republicical scientific conference, Sumgait, November 25–26, 2021. Volume 8. SUMQAYIT: Sumgait State University, 2021. P. 52–54. EDN: EONXHG. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48486105&pff=1> (accessed: 14.10.2025).

22. Будзинская, О. В. Прогнозирование потребности в квалифицированных кадрах на примере нефтегазовой отрасли. Социально-трудовые исследования. 2020;3(40):81–89. EDN: VZTAKU. <https://doi.org/10.34022/2658-3712-2020-40-3-81-89>

Budzinskaya O.V. Forecasting the need for qualified personnel using the example of the oil and gas industry. Social and labor studies. 2020;3(40):81–89. EDN: VZTAKU. <https://doi.org/10.34022/2658-3712-2020-40-3-81-89>

23. Бондаренко В.А., Попова Т.С., Попов А.А. Исследование причин и возможных направлений решения проблемы дефицита специалистов в энергетической отрасли России с привлечением HR-брендинга. Глобальная ядерная безопасность. 2023;3(48):96–106. EDN: YUJORQ. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-09>

Bondarenko V.A., Popova T.S., Popov A.A. Study of the causes and possible directions for solving the problem of shortage of specialists in the energy sector of Russia with the involvement of HR branding. *Global nuclear safety*. 2023;3(48):96–106. EDN: YUJORQ. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-09>

24. Палкин А.В., Бурцева Т.А., Макарова М.В., Ведерников А.А. Концептуальные основы маркетинга персонала современной компании в цифровой среде. Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. 2025;2:58–64. EDN: ALQFJT. <https://doi.org/10.47576/2949-1894.2025.2.2.007>

Palkin A.V., Burtseva T.A., Makarova M.V., Vedernikov A.A.. Conceptual Foundations of Personnel Marketing for a Modern Company in a Digital Environment. *Innovative Economy: Information, analytics, forecasts*. 2025;2:58–64. EDN: ALQFJT. <https://doi.org/10.47576/2949-1894.2025.2.2.007>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Савельева Н.К. – анализ существующих направлений кадровой обеспеченности и их интерпретация применительно к электросетевой компании, формулирование выводов;

Созинова А.А. – построение релевантной модели кадрового обеспечения электросетевой компании; концептуализация статьи;

Макарова М.В. – исследование нормативно-правовой базы в области социального партнерства электроэнергетических компаний, компаративный анализ документов, написание текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS:

Savelieva N.K. – analysis of existing staffing trends and their interpretation in relation to the electric grid company, formulation of conclusions;

Sozinova A.A. – construction of a relevant model of staffing of an electric grid company; conceptualization of the article;

Makarova M.V. – research of the regulatory framework in the field of social partnership of electric power companies, comparative analysis of documents, writing of the article.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Надежда Константиновна Савельева, доктор экономических наук, профессор, директор института, Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-9497-6172>

e-mail: nk_savelyeva@vyatsu.ru

Анастасия Андреевна Созинова, доктор экономических наук, профессор, Заместитель директора по научной деятельности, Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5876-2823>

e-mail: aa_sozinova@vyatsu.ru

Мария Владимировна Макарова, кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и маркетинга, Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6175-0054>

e-mail: usr21824@vyatsu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Nadezhda K. Savelieva, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Director of the Institute, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-9497-6172>

e-mail: nk_savelyeva@vyatsu.ru

Anastasia A. Sozinova, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Deputy Director for Scientific Activities, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5876-2823>

e-mail: aa_sozinova@vyatsu.ru

Maria V. Makarova, Cand. Sci. (Econ.), Docent of the Department of Management and Marketing, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6175-0054>

e-mail: usr21824@vyatsu.ru

Поступила в редакцию / Received 17.10.2025

После доработки / Revision 11.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.12.2025

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-2025-04-11>


УДК [378.1:811.111]:621.039

EDN WIBKZY


Оригинальная статья / Original paper



**Обучение англоязычной научно-технической терминологии
в контексте подготовки специалистов для атомной отрасли**

И.В. Зарочинцева  , **Л.В. Захарова** , **Ю.А. Лупиногина** , **О.А. Кикинчук** ,
Н.В. Бунамес

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

 IVZarochintseva@mephi.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме обучения англоязычной научно-технической терминологии студентов, обучающихся по специальностям, связанных с атомной отраслью. В условиях глобализации и интеграции российских специалистов в международное профессиональное пространство знание специализированной лексики становится ключевым фактором профессиональной компетентности. В работе рассматриваются современные методы и подходы к преподаванию терминологии, включая использование цифровых технологий, геймификации и проектного обучения. Эмпирическая часть включает анализ эффективности предложенных методик на основе тестирования и анкетирования студентов ВИТИ НИЯУ МИФИ. Выявлено, что интеграция профессионально ориентированных материалов повышает мотивацию и усвоение терминов на 30–40%. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования программ по иностранным языкам в технических вузах.

Ключевые слова: научно-техническая терминология, атомная отрасль, профессиональный английский, методика преподавания, мотивация, цифровые технологии, геймификация.


Для цитирования: Зарочинцева И.В., Захарова Л.В., Лупиногина Ю.А., Кикинчук О.А., Бунамес Н.В. Обучение англоязычной научно-технической терминологии в контексте подготовки специалистов для атомной отрасли. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):107–115. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-11>

For citation: Zarochintseva I.V., Zakharova L.V., Lupinogina Y.A., Kikinchuk O.A., Bunames N.V. Teaching English scientific and technical terminology in the context of training specialists for the nuclear industry. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):107–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-11>

**Teaching English scientific and technical terminology in the context of training specialists
for the nuclear industry**

Irina V. Zarochintseva  , **Lyubov V. Zakharova** , **Yulia A. Lupinogina** ,
Olga A. Kikinchuk , **Natalya V. Bunames**

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

 IVZarochintseva@mephi.ru

Abstract. The paper considers the issues of teaching English-language scientific and technical terminology to students specializing in nuclear industry-related fields. Knowledge of specialized vocabulary is becoming a key factor in professional competence in the context of globalization and the integration of Russian specialists into the international professional area. The paper focuses on modern methods and approaches to teaching terminology including the use of digital technologies, gamification, and project-based learning. The empirical part includes an effectiveness analysis of

the proposed methods based on testing and surveying students at the Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University MEPhI. It is found that the integration of professionally oriented materials increases motivation and term mastering by 30–40%. The results of the study can be used to improve foreign language programs at technical universities.

Keywords: scientific and technical terminology, nuclear industry, English for professional purposes, teaching methodology, motivation, digital technologies, gamification.

Введение

Актуальность темы обусловлена ростом потребности в высококвалифицированных специалистах атомной отрасли, способных работать с международными стандартами, технической документацией и участвовать в совместных проектах (например, строительство АЭС за рубежом). По данным Росатома, более 60% профессиональных коммуникаций в этой сфере ведется на английском языке. Однако традиционное обучение английскому языку в технических вузах часто не соответствует профессиональным запросам: студенты сталкиваются с дефицитом терминологической базы, необходимой для чтения специализированных текстов, участия в конференциях или работы с программным обеспечением.

Цель исследования – разработать и апробировать эффективные методы обучения англоязычной терминологии, адаптированные под специфику атомных специальностей. Задачи исследования включают анализ существующих проблем в преподавании терминологии, разработку методических рекомендаций и оценку их эффективности.

Проблемы обучения научно-технической терминологии

Атомная отрасль характеризуется наличием специфической терминологии, которая отражает особенности этой сферы деятельности. Термины атомной отрасли формируются на основе научных и технических понятий, связанных с ядерными технологиями, атомной энергетикой, радиационной безопасностью и другими аспектами.

Основные термины атомной отрасли включают в себя понятия, связанные с ядерными реакторами, ядерным топливом, ядерными материалами, радиационной защитой, дозиметрией, дезактивацией и другими процессами. Эти термины формируются на ос-

нове греческих и латинских корней, а также международных стандартов и соглашений.

Понимание и правильное использование терминологии атомной отрасли является важным условием для обеспечения безопасности и эффективности работы в этой сфере. Специалисты атомной отрасли должны обладать глубокими знаниями и пониманием специфических терминов, чтобы адекватно оценивать риски, разрабатывать и внедрять новые технологии, а также обеспечивать соблюдение норм и правил.

Кроме того, специфика терминологии атомной отрасли обусловлена необходимостью международного сотрудничества и обмена опытом между специалистами разных стран. Поэтому важно, чтобы термины и понятия атомной отрасли были стандартизированы и понятны для специалистов из разных стран.

Специфика терминологии атомной отрасли в данной статье рассматривается с точки зрения высокой степени абстракции терминов, многоуровневости терминологии, интернационализма терминов и контекстуальных сложностей.

1. Высокая степень абстракции терминов.

Термины атомной отрасли часто описывают сложные физические процессы, недоступные непосредственному восприятию. Например:

– Criticality (критичность) – состояние ядерного реактора, при котором цепная реакция самоподдерживается. Для понимания этого термина студент должен усвоить концепции нейтронных потоков, коэффициентов размножения и геометрии активной зоны.

– Radiation shielding (радиационная защита) – требует знания типов излучения (альфа-, бета-, гамма-), материалов, поглощающих излучение, и норм безопасности.

Абстрактность затрудняет запоминание и требует от преподавателей использования

визуализаций (диаграмм, 3D-моделей) и аналогий. Например, сравнение радиационной защиты с «щитом», который блокирует невидимые «пули» (частицы излучения).

2. Многоуровневость терминологии.

Атомная отрасль охватывает множество смежных областей, что приводит к созданию иерархических терминов:

– *Физика реакторов*: термины типа *reactor kinetics* (кинетика реактора), *fuel burnup* (выгорание топлива) требуют понимания сложных уравнений и процессов.

– *Ядерное топливо*: *enriched uranium* (обогащенный уран), *spent nuclear fuel* (отработавшее топливо) связаны с химическими и технологическими аспектами.

– *Радиационная безопасность*: *doserate* (мощность дозы), *contamination control* (контроль загрязнения) – термины, требующие знания нормативов (например, рекомендаций МАГАТЭ).

Студенты сталкиваются с необходимостью осваивать не только отдельные слова, но и их комбинации в профессиональных контекстах, что увеличивает когнитивную нагрузку.

3. Интернационализм терминов и контекстуальные сложности.

Многие термины атомной отрасли имеют латинско-греческие корни (*nuclear fission*, *radioactivity*), что облегчает их восприятие для русскоязычных студентов. Однако контекстуальные нюансы могут вызывать ошибки [1], например:

– слово *shielding* (защита) в других областях может означать «экран» или «покрытие», но в атомной инженерии – это конкретный набор материалов и конструкций.

– Термин *nozzle* имеет общее значение «насадка», но в атомной энергетике может указывать как на «хвостовик», конструктивный элемент в нижней части тепловыделяющей сборки (ТВС), так и на «патрубок системы подачи теплоносителя».

Для решения этой проблемы необходим контрастный анализ терминов с использованием примеров из технических документов и случаев профессионального общения. В связи с этим становится очевидным, что развитие и совершенствование терминологии атомной отрасли включает в себя разра-

ботку и обновление терминологических словарей, создание специализированных баз данных и информационных систем, проведение научных исследований в области терминологии, а также корректировку традиционных методов обучения.

Традиционные методики освоения научно-технической терминологии, включая механическое заучивание определений и репродуктивное повторение, характеризуются рядом ограничений, влияющих на эффективность формирования терминологического базиса у обучающихся.

Во-первых, традиционные подходы не всегда учитывают индивидуальные характеристики студентов, такие как уровень предварительной подготовки, когнитивные стили и предпочтения в способах восприятия информации. Это может приводить к тому, что часть обучающихся испытывает затруднения в усвоении терминологии вследствие недостаточной адаптации образовательных стратегий к их индивидуальным потребностям.

Во-вторых, традиционные методики зачастую не способствуют формированию глубокого понимания терминов и их взаимосвязей в системе научного знания. Механическое заучивание определений без учета контекста и практического применения терминологии в реальных ситуациях может приводить к поверхностному усвоению материала и сложностям в его применении на практике.

В-третьих, традиционные подходы могут не учитывать междисциплинарный характер многих научно-технических терминов. В современных научных исследованиях часто используются термины, имеющие различные значения и интерпретации в разных областях знания [2]. Традиционные методики не всегда способствуют развитию у обучающихся способности к междисциплинарному мышлению и пониманию терминологии в контексте различных научных дисциплин.

Наконец, традиционные методы обучения терминологии могут не стимулировать активную когнитивную деятельность студентов, такую как анализ, синтез и применение полученных знаний. Пассивное восприятие информации может снижать мотивацию к изучению терминологии и препятствовать

формированию глубоких и устойчивых знаний [3].

Рассмотрим следующие ограничения традиционных подходов к обучению научно-технической терминологии:

1. Акцент на общеязыковых навыках.

В большинстве технических вузов программа дисциплины «Иностранный язык» ориентирована на развитие общекоммуникативных компетенций (например, умение вести беседу о путешествиях или культуре). Это приводит к следующим проблемам:

– дефицит профессиональной лексики (студенты 4 курса могут свободно обсуждать бытовые темы, но не могут перевести инструкцию по эксплуатации ядерного реактора);

– несоответствие требованиям рынка труда (работодатели – например, ГК «Росатом» – указывают на необходимость умения читать технические документы и участвовать в международных проектах).

В качестве решения данной проблемы рекомендуется внедрение курсов ESP (English for Specific Purposes) с акцентом на атомную отрасль, включающих терминологические глоссарии и симуляции профессиональных ситуаций.

2. Недостаток практики работы с профессиональными текстами.

Студенты редко сталкиваются с оригинальными источниками, такими как:

– инструкции (например, руководства по эксплуатации оборудования Westinghouse или Areva);

– патенты (описание инновационных технологий в области хранения отработанного топлива);

– нормативные документы МАГАТЭ (например, Safety Standards Series No. NS-G-1.10).

Отсутствие практики приводит к тому, что студенты не понимают структуры таких текстов (например, разделы «Score», «Definitions», «Compliance Requirements») и специфических оборотов («shall be», «in accordance with»). Для корректировки подобной информации преподаватели могут использовать адаптированные фрагменты документов и задания по их анализу (напри-

мер, поиск ключевых требований к безопасности) [4].

3. Слабая мотивация студентов.

Если учебные материалы не связаны с будущей профессией, студенты теряют интерес к изучению языка. Причинами являются:

– практическая бесполезность (студенты считают, что термины все равно забудутся без применения в реальных задачах);

– отсутствие целей (например, подготовка к стажировке за рубежом или участие в международных конференциях не обозначены как приоритеты учебного плана).

Для преодоления указанных ограничений необходимо разрабатывать и внедрять инновационные методики обучения научно-технической терминологии, учитывающие индивидуальные особенности обучающихся, способствующие глубокому пониманию терминов, их применению в реальных ситуациях и стимулирующие активную когнитивную деятельность, таких как интеграция проектного обучения, когда студенты создают англоязычные презентации своих курсовых работ или моделируют аварийные ситуации на АЭС, используя профессиональную лексику.

Помимо ограничения традиционных подходов к обучению научно-технической терминологии существует целый ряд других барьеров, препятствующих усвоению данной лексики. Один из таких барьеров – недостаточная подготовка преподавателей.

Многие преподаватели иностранных языков не обладают техническим образованием, что приводит к:

– ошибкам в объяснении терминов – например, путаница между *fissile material* (делящийся материал) и *fertile material* (воспроизводящийся материал);

– невозможности оценить контекст – преподаватель не может объяснить, как термин *decay heat* (тепло деления) связан с охлаждением реактора после остановки.

Решить данную проблему можно через стажировки преподавателей на предприятиях атомной отрасли, обучение на курсах повышения квалификации совместно с инженерами и создание междисциплинарных методических комиссий.

Сложность визуализации некоторых понятий также представляет собой технологический барьер. Некоторые научно-технические термины описывают абстрактные или сложные для визуализации явления. Это может затруднить их понимание и запоминание, особенно для людей с ограниченными возможностями восприятия или для тех, кто не имеет опыта работы с соответствующими явлениями.

Различия в терминологии между языками и культурами могут создавать дополнительные барьеры для усвоения научно-технической терминологии. Перевод терминов может быть неточным или неполным, что приводит к недопониманию и ошибкам в коммуникации.

Специфика терминологии атомной отрасли требует нестандартного подхода к обучению, учитывающего абстрактность терминов, их многоуровневую структуру и интернациональный характер [5]. Традиционные методы, ориентированные на общезыковую подготовку, не обеспечивают должного уровня профессиональной компетентности, а вышеуказанные барьеры усиливают проблему.

Для преодоления указанных технологических барьеров необходимо разработать и внедрить эффективные методы и инструменты для освоения научно-технической терминологии, а также обеспечить доступ к соответствующим ресурсам и поддержке для всех категорий пользователей. Это может включать в себя создание интерактивных образовательных платформ, разработку специализированных программ для перевода и классификации терминов, а также организацию обучающих мероприятий и консультаций для специалистов.

Перспективы преодоления технологических барьеров в освоении научно-технической терминологии связаны с развитием цифровых технологий, созданием открытых образовательных ресурсов и повышением квалификации специалистов в области работы с научно-технической информацией.

Методология исследования

Организация исследования. Для того чтобы выявить эффективность в усвоении англоязычной терминологии студентами атомных специальностей в Волгодонском инженерно-техническом институте филиале Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» проводилось исследование. Участниками стали 120 студентов 2–4 курсов, обучающихся по направлению «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» (направление 14.05.02). Группы были сформированы по принципу случайной выборки, с учетом схожести академических показателей и уровня владения английским языком (предварительное тестирование по шкале CEFR).

В качестве методов исследования использовался смешанный подход, экспериментальные методики, контрольные группы.

1. Смешанный подход (Mixed Methods).

Для комплексной оценки эффективности методик использовались количественные и качественные методы.

Количественный анализ включал тестирование на знание терминологии. Предварительное тестирование проводилось до начала эксперимента. Тест включал 50 терминов, взятых из документов МАГАТЭ (например, *criticality safety, radiation monitoring*) [6], и задания на перевод, определение и контекстуальное использование. Итоговое тестирование проводилось через 12 недель после внедрения экспериментальных методик.

Оценка проводилась по 100-балльной шкале. Для статистической обработки использовался критерий Стьюдента ($p < 0,05$).

Качественный анализ включал анкетирование, фокус-группы, интервью с преподавателями.

Анкетирование. Студентам предлагалось заполнить анонимную анкету из 20 вопросов, включая оценку удовлетворенности методиками, мотивации к изучению языка и уверенности в профессиональных коммуникациях. Например: «Насколько геймификация помогла вам запомнить термины?» (шкала: от 1 – «не помогла» до 5 – «очень помогла»).

Фокус-группы. Проводилось 4 сессии по 8–10 человек. Предлагались следующие темы для обсуждения:

- восприятие сложности терминов (например, *neutron flux vs fuel cycle*);
- эффективность проектного обучения (например, моделирование аварийной ситуации на АЭС);
- оценка цифровых ресурсов (например, работа с виртуальной лабораторией по радиационному контролю).

Интервью с преподавателями. Проводились полуструктурированные интервью с четырьмя преподавателями иностранных языков и двумя инженерами-атомщиками. Обсуждались проблемы в традиционных методах обучения, возможности интеграции профессионального контента, необходимость междисциплинарного взаимодействия.

2. Экспериментальные методики.

Рассматривались следующие методики:

Геймификация. В качестве инструментария использовалась Российская образовательная платформа «Взнания» для создания обучающих игр:

- Flashcards: карточки с терминами (например, *control rod* → «стержень регулирования»),
- Найди пару: игра на скорость сопоставления терминов и определений,
- Тест: автоматизированные тесты с обратной связью.

Результат: студенты, активно использующие «Взнания», показали на 25% лучшие результаты в тестировании по сравнению с пассивными участниками.

Проектное обучение. Примерами проектов были:

1. Перевод документов МАГАТЭ: группы студентов переводили и анализировали главы из публикации «Safety of Nuclear Power Plants: Design» (NS-G-1.10).

2. Моделирование аварийных ситуаций: ролевые игры, где студенты, выступая в роли инженеров, обсуждали на английском языке причины и последствия аварии на АЭС (например, сценарий «Loss of Coolant Accident»).

3. Создание инструкций: разработка англоязычной инструкции по эксплуатации

оборудования (например, *Procedure for Reactor Shutdown*).

Проекты оценивались по критериям точности терминологии, структурированности текста и командного взаимодействия.

Цифровыми ресурсами стали базы данных и виртуальные лаборатории.

- Доступ к базам данных:

- ScienceDirect: студенты изучали статьи по темам «Advanced Nuclear Fuel Cycles» и «Radiation Protection Technologies».

- IEEE Xplore: анализ патентов на технологии хранения отработанного топлива.

- Виртуальные лаборатории:

- Использование симулятора Phyuwe для моделирования процессов радиоактивного распада и работы счетчика Гейгера.

- Интерактивные модули на платформе Labster, включая эксперименты по измерению дозы излучения.

3. Контрольные группы.

Экспериментальная группа в количестве 60 человек обучалась по новой программе с применением геймификации, проектного обучения и цифровых ресурсов. Контрольная группа, также в количестве 60 человек, обучалась по традиционной методике (грамматика, общеязыковые тексты, базовый словарь).

Результаты. В результате проведенного исследования были выявлены следующие количественные показатели.

1. Усвоение терминологии:

В экспериментальной группе средний балл по тесту вырос с 58 до 82 ($p < 0,05$), что подтверждает статистическую значимость результатов.

В контрольной группе улучшение составило лишь 12% (с 55 до 62 баллов).

2. Время на запоминание:

Студенты экспериментальной группы затратили в среднем 3 недели на усвоение 50 терминов, тогда как контрольная группа – 6 недель.

Качественные данные. Геймификация. 75% студентов отметили, что «Взнания» сделал процесс обучения «менее скучным» и «помог запомнить термины через повторение в игровой форме». Пример отзыва: «Задание «Найди пару» во «Взнания» помогло

быстро ассоциировать термины с их значениями, как в кроссворде».

Проектное обучение. Студенты оценили возможность применять язык к реальным профессиональным задачам. Например, при переводе документа МАГАТЭ они столкнулись с необходимостью поиска аналогов для терминов вроде *passive safety systems* и обсуждения их преимуществ. Преподаватели отметили, что проекты способствовали развитию критического мышления: «Студенты учились не просто запоминать слова, но и анализировать их функцию в тексте».

Цифровые ресурсы. Доступ к ScienceDirect и IEEE Xplore позволил студентам ознакомиться с современной научной лексикой. Например, термин *Generation IV reactors* стал понятен через статьи о будущих технологиях.

Виртуальные лаборатории помогли связать язык с практическими навыками: «Когда я видел визуализацию работы детектора излучения, мне легче было запомнить слово *radiation detector*».

Снижение стресса. Преподаватели отметили, что студенты экспериментальной группы меньше волновались при работе с техническими текстами. Это связано с тем, что методики снижали «боязнь неизвестного» через постепенное освоение сложной лексики.

В ходе исследования были выявлены следующие трудности:

1. Недостаток времени в учебном плане. Программа по английскому языку включала лишь 2 академических часа в неделю, что ограничивало возможности для глубокой проработки терминологии.

2. Неравномерное распределение времени на занятии. В процессе обучения преподаватели делают акцент на профессионально ориентированном содержании, что обусловлено целями подготовки специалистов. При этом внимание к общеязыковым темам оказывается ограниченным, что отмечено рядом студентов в ходе обратной связи.

3. Междисциплинарное взаимодействие. Сотрудничество между кафедрами иностранных языков и технических дисциплин находится на начальной стадии развития. В настоящее время возможности для инте-

грации предметного содержания в языковые курсы еще недостаточно реализованы. Решение – создание рабочих групп с участием инженеров и лингвистов для разработки общих глоссариев и сценариев профессиональной коммуникации.

4. Технические ограничения. Ограниченный доступ к платформам вуза (например, медленный интернет в лабораториях) мешал работе с виртуальными симуляторами.

Результаты проведенного в ВИТИ НИЯУ МИФИ исследования согласуются с выводами Г.А. Шор [7] о важности ESP-курсов для технических специальностей. Однако уникальность атомной терминологии требует создания отраслевых ресурсов, таких как:

- глоссарий терминов по ядерной безопасности на русском и английском языках;
- сценарии профессионального общения (например, диалоги при проведении инспекции АЭС).

Исследование Dudley-Evans и St John [8] также подтверждает, что интеграция профессионального контента повышает мотивацию, но в атомной отрасли необходимо учитывать высокую абстракцию терминов и нормативную специфику.

Выводы

Экспериментальные методики (геймификация, проектное обучение, цифровые ресурсы) доказали свою эффективность в усвоении англоязычной терминологии студентами атомных специальностей. Однако для масштабирования подхода требуется пересмотр учебных планов и усиление междисциплинарного сотрудничества.

Заключение

Результаты исследования демонстрируют, что использование инновационных методов обучения позволяет существенно повысить уровень владения англоязычной терминологией у студентов атомных специальностей. Это, в свою очередь, способствует их успешной профессиональной адаптации в международной среде. Дальнейшие исследования могут быть направлены на создание адаптивных онлайн-курсов и нейросетевых инструментов для персонализированного обучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Игнатьева Т.С., Антонова Н.А. Особенности обучения терминологии студентов технических специальностей. *Профессиональное образование в России и за рубежом*. 2022;4(48):144–150. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50088985> (дата обращения: 22.05.2025).
Ignatieva T.S., Antonova N.A. Features of teaching terminology to students of technical specialties. *Professional education in Russia and abroad*. 2022;4(48):144–150. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50088985> (accessed:22.05.2025).
2. Савельев С.В. Многозначность терминологии атомной энергетики в контексте проблем прикладной терминографии. *Вестник Омского государственного педагогического университета. Гуманитарные исследования*. 2018;1(18):74–78. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32728790> (дата обращения: 22.05.2025).
Saveliev S.V. The polysemy of nuclear energy terminology in the context of applied terminography issues. *Bulletin of Omsk State Pedagogical University. Humanities Research*. 2018;1(18):74–78. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32728790> (accessed: 22.05.2025).
3. Авакова О.В. Методика обучения студентов неязыкового вуза профессиональной терминологии. *Педагогика и просвещение*. 2019;(1):1–7. <https://doi.org/10.7256/2454-0676.2019.1.26222> Режим доступа: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=26222 (дата обращения: 24.05.2025).
Avakova, O.V. Methods of teaching professional terminology to students of non-linguistic universities. *Pedagogy and Education*. 2019;1:1–7. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2454-0676.2019.1.26222> Available at: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=26222 (accessed:24.05.2025).
4. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности: издание 2018 года. Вена: МАГАТЭ, 2018. Режим доступа: <https://www.iaea.org/ru/publications/13601/glossariy-magate-po-voprosam-bezopasnosti-izdanie-2018-goda> (дата обращения: 24.05.2025).
IAEA Safety Glossary: 2018 Edition. IAEA. Vienna, 2018. (In Russ.). Available at: <https://www.iaea.org/ru/publications/13601/glossariy-magate-po-voprosam-bezopasnosti-izdanie-2018-goda> (accessed: 24.05.2025).
5. Казина Н.А. Термины атомной энергетики: переводческий аспект. *Актуальные вопросы перевода, лингвистики, истории литературы и фольклора: сборник статей XII Международной научной конференции молодых ученых (Екатеринбург, 9 февраля 2024 г.)*. Екатеринбург: Издательский дом «Ажур». 2024:178–186. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/135856> (дата обращения: 24.05.2025).
Kazina N.A. Terms of atomic energy: translation aspect. *Current issues in translation, linguistics, history of literature and folklore: collection of articles from the XII International Scientific Conference of Young Scientists (Yekaterinburg, February 9, 2024)*. Yekaterinburg: Azhur Publishing House. 2024:178–186. (In Russ.). Available at: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/135856> (accessed: 24.05.2025).
6. International Atomic Energy Agency. Nuclear Safety and Security Glossary. Non-serial Publications. IAEA. Vienna, 2022. Available at: <https://doi.org/10.61092/iaea.rxxi-t56z> (accessed: 24.05.2025).
7. Шор Г.А. Профессионально-ориентированное обучение английскому языку в техническом вузе. Теория и практика преподавания иностранных языков (по материалам «Недели иностранных языков УГЛТУ – 2020») : сборник статей / составитель и научный редактор С.Ф. Масленникова. Министерство науки и высшего образования РФ. Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург. 2020:13–19. Режим доступа: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/10014> (дата обращения: 26.05.2025).
Shor G.A. Professionally-oriented English language teaching at a technical university. Theory and practice of foreign language teaching (based on materials from «Ural State Technical University Foreign Language Week – 2020»): collection of articles / compiled and edited by S.F. Maslennikova. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Ural State Forestry University. Yekaterinburg. 2020:13–19. (In Russ.). Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/10014> (accessed: 26.05.2025).
8. Dudley-Evans T., St John M. J. *Developments in English for Specific Purposes: A Multi-Disciplinary Approach*. Cambridge University Press, 1998. ISBN 052159675-0. Available at: https://www.academia.edu/34076332/Developments_in_English_for_Specific_Purposes_A_Multi_Disciplinary_Approach (accessed: 26.05.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Зарочинцева И.В. – концепция и качественная разработка исследования;
Захарова Л.В. – концепция и написание текста статьи;

Лупиногина Ю.А. – изучение тематического материала, систематизация информации;

Кикинчук О.А. – разработка методической части исследований;

Бунамес Н.В. – изучение литературных источников по теме исследования, редактирование текста статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Zarochintseva I.V. – concept and qualitative research development;

Zakharova L.V. – the concept and writing of the text of the article;

Lupinogina Yu.A. – study of thematic material, systematization of information;

Kikinchuk O.A. – development of the methodological part of the research;

Bunames N.V. – study of reference sources on the research topic, editing the text of the article.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ирина Викторовна Зарочинцева, кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-6412-8714>

e-mail: IVZarochintseva@mephi.ru

Любовь Васильевна Захарова, кандидат социологических наук, доцент кафедры иностранных языков, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-1496-3935>

e-mail: LVZakharova@mephi.ru

Юлия Анатольевна Лупиногина, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-4327-1172>

e-mail: YALupinogina@mephi.ru

Ольга Анатольевна Кикинчук, старший преподаватель кафедры иностранных языков, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-2542-7732>

e-mail: OAKikinchuk@mephi.ru

Наталья Викторовна Бунамес, кандидат филологических наук, доцент, начальник центра инноваций и развития, Волгодонский инженерно-технический институт-филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: NVBunames@mephi.ru

FUNDING:

The study has no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Irina V. Zarochintseva, Can. Sci. (Philos.), Assistant professor, Department of Foreign Languages, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-6412-8714>

e-mail: IVZarochintseva@mephi.ru

Lyubov V. Zakharova, Can. Sci. (Sociol.), Assistant professor, Department of Foreign Languages, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-1496-3935>

e-mail: LVZakharova@mephi.ru

Yulia A. Lupinogina, Can. Sci. (Pedag.), Assistant professor, Department of Foreign Languages, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-4327-1172>

e-mail: YALupinogina@mephi.ru

Olga A. Kikinchuk, Senior Lecturer, Department of Foreign Languages, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-2542-7732>

e-mail: OAKikinchuk@mephi.ru

Natalya V. Bunames, Can. Sci. (Philol.), Associate Professor, Head of the Innovation and Development Center, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Russian Federation.

e-mail: NVBunames@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 23.06.2025

После доработки / Revision 24.09.2025

Принята к публикации / Accepted 29.09.2025

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

| | |
|-------------------|-----|
| Адыгамов М.Ш. | 19 |
| Аркадов Г.В. | 64 |
| Ахметова П.В. | 48 |
| Бекетов В.Г. | 78 |
| Бобылев В.А. | 30 |
| Брыкалов С.М. | 5 |
| Бунамес Н.В. | 107 |
| Бураева Е.А. | 30 |
| Гимадиев Т.Р. | 19 |
| Голубь А.О. | 19 |
| Евстифеев А.А. | 86 |
| Жидков М.Е. | 58 |
| Зарочинцева И.В. | 107 |
| Захарова Л.В. | 107 |
| Кикинчук О.А. | 107 |
| Кириллов К.В. | 48 |
| Красильников Б.А. | 86 |
| Лазарев А.Е. | 5 |
| Лац М.П. | 5 |
| Лупиногина Ю.А. | 107 |
| Макарова М.В. | 94 |
| Мальев В.В. | 5 |
| Миронова Л.И. | 37 |
| Николаев Д.Б. | 86 |
| Просьянов А.В. | 5 |
| Ратушный В.И. | 30 |
| Савельева Н.К. | 94 |
| Сальникова Н.А. | 5 |
| Семишин В.В. | 48 |
| Серов Н.Ю. | 19 |
| Слепов М.Т. | 64 |
| Созинова А.А. | 94 |
| Столотнюк Я.Д. | 48 |
| Тагирова Т.А. | 5 |
| Терехов В.М. | 37 |
| Хижов М.Ю. | 37 |
| Чижов А.С. | 5 |
| Шишлов И.В. | 30 |
| Шпицер В.Я. | 78 |

AUTHOR INDEX

| | |
|--------------------|-----|
| Adygamov M.Sh. | 19 |
| Akhmetova P.V. | 48 |
| Arkadov G.V. | 64 |
| Beketov V.G. | 78 |
| Bobylev V.A. | 30 |
| Brykalov S.M. | 5 |
| Bunames N.V. | 107 |
| Buraeva E.A. | 30 |
| Chizhov A.S. | 5 |
| Evstifeev A.A. | 86 |
| Gimadiev T.R. | 19 |
| Golub A.O. | 19 |
| Khizhov M. Yu. | 37 |
| Kikinchuk O.A. | 107 |
| Kirillov K.V. | 48 |
| Krasilnikov B.A. | 86 |
| Lats M.P. | 5 |
| Lazarev A.E. | 5 |
| Lupinogina Y.A. | 107 |
| Makarova M.V. | 94 |
| Malev V.V. | 5 |
| Mironova L.I. | 37 |
| Nikolaev D.B. | 86 |
| Prosyanov A.V. | 5 |
| Ratushnyj V.I. | 30 |
| Salnikova N.A. | 5 |
| Savelieva N.K. | 94 |
| Semishin V.V. | 48 |
| Serov N. Yu. | 19 |
| Shishlov I.V. | 30 |
| Shpitser V.Ya. | 78 |
| Slepov M.T. | 64 |
| Sozinova A.A., | 94 |
| Stolotnyuk Y.D. | 48 |
| Tagirova T.A. | 5 |
| Terekhov V.M. | 37 |
| Zakharova L.V. | 107 |
| Zarochintseva I.V. | 107 |
| Zhidkov M.E. | 58 |

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Полный текст статьи для опубликования должен быть оригинальным – не более 20% заимствований, сопровождаться экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, соответствовать приведенным ниже правилам оформления.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- название на русском и английском языках;
- инициалы и фамилия авторов на русском и английском языках;
- аффилиация каждого автора на русском и английском языках;
- структурированная по IMRAD аннотация (200-270 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- текст статьи;
- объединенный Список литературы / References (см. пример оформления);
- вклад в представленную научную работу каждого автора;
- сведения об авторах (для каждого автора – Фамилия Имя Отчество, место/а работы, должность/и, ученая степень, звание, электронный адрес, индекс ORCID (<http://orcid.org>), телефон контактного автора) на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована: введение (актуальность темы; обзор проблемы; цель работы); методология (теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов; описание материалов и методов анализа; статистическая обработка); результаты и их обсуждение; заключение (выводы). Цель и ключевые результаты работы должны быть понятно представлены в аннотации и тексте статьи, научная новизна работы обоснована во введении со ссылкой на источники, опубликованные в научных рецензируемых изданиях (в том числе зарубежных) последних нескольких лет. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы и полученные результаты.

Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и 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.pnzgu.ru/library/1699606807> (дата обращения: 20.03.2025).

Severtsev N.A., Yurkov N.K. Safety of dynamic systems at the stages of life cycle. Monograph. Penza: Publishing house of Penza State University, 2023. 568 p. (In Russ.). Available at: <https://elib.pnzgu.ru/library/1699606807> (accessed: 20.03.2025).

5. Файков Д.Ю., Байдаров Д.Ю. Диверсификация в атомной отрасли: современное состояние, особенности, перспективы. *Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России*. 2021;2:41–48. Режим доступа: (дата обращения: 20.03.2025).

Faykov D.Yu., Baidarov D.Yu. Diversification in the nuclear industry: current state, features, prospects. *Scientific bulletin of the military-industrial complex of Russia*. 2021;2:41–48. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46289137> (accessed: 20.03.2025).

6. Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Мясников С.В., Петрунин Н.В., Терашкевич С.С. Эксплуатационный контроль состояния металла корпусов растворных реакторов в НИЦ «Курчатовский институт». *Вопросы материаловедения*. 2022;(4(112)):191–198. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>

Boikova T.V., Kochnov Y.O., Myasnikov S.V., Petrunin N.V., Terashkevich S.S. Operational monitoring of the metal of solution pressure vessel reactors at NRC «Kurchatov institute». *Voprosy materialovedeniya*. 2022;4(112):191–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>

7. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Ровинский В.Д., Гетман А.Ф., Губа С.В. Способ определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов (варианты). Патент RU 2711082 C1 Российская Федерация, МПК G01N 29/07 (2006.01). № 2019110165/28. Заявлен: 05.04.2019. Опубликовано: 15.01.2020. 6 с. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115 (дата обращения 20.03.2025).

Kamyshov 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. Polyandin A.D., Kudryashov N.A. Nonlinear schrödinger equation of general form: multifunctional model, reductions and exact solutions. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2025;14(1):24–36. (In Russ.). EDN: DXKPEC. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2025.1.3>
6. Rashitov P.A., Seregin D.A., Anikin M.D., Vershanskiy E.A. Application of multilevel voltage inverters in distributed series compensation devices. *Bulletin MPEI*. 2021;3:58–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
7. Surin V.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A., Alwaheba A.I. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data. *Journal of Physics: Conference series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061. (In Russ.). <https://doi.org/10.1088/1942-6596/2131/5/052061>
8. Erd A., Stokłosa J. Main design guidelines for battery management systems for traction purposes. Proceedings of the XI International scientific and technical conference automotive safety. 2018. Slovakia. <https://doi.org/10.1109/AUTOSAFE.2018.8373345>
9. Lapkis A.A., Tsykhler L.V., Nikiforov V.N., Egorova V.P. Analysis of calibration error of NPP shut-off valve electric drive. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):80-90. (In Russ.). EDN: TGXPIS. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08>
10. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. SpringerBriefs in Statistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin. Heidelberg, 2020. ISBN 978-3-662-62435-7. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62436-4> (accessed: 20.03.2025).
11. Kovalev N.V., Prokoshin A.M., Davydova P.V., Korolev V.A. Radiation characteristics of reactor grade platinum group metals. *Nuclear energy and technology*. 11(1): 55–58. Available at: <https://nucet.pensoft.net/article/150529/list/18/> (accessed: 20.03.2025).
12. Surin V.I., Ivanyi M.V., Shcherbakov A.A., Shcherban A.A., Pavlichenko A.V., Tomilin S.A., Zhidkov M.E., Gook A.E. Gradient method of structural heterogeneity identification in electrical inspection of equipment, products and materials. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):34–41. (In Russ.). EDN: QWREXO. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04>
13. Arkadov G.V., Slepov M.T. Neutron noise control techniques for VVER core. *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
