

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Глобальная ядерная безопасность

(научно-практический журнал)

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

Том 15, № 1 (54), 2025

Журнал включен в перечень ВАК РФ (1063)

Научные специальности:

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

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Выпускающий редактор:

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

Редакционная коллегия:

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

Мажын 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 Гок, PhD в области техн. наук, Институт производственных систем и технологий конструирования ИПК Общества Фраунгофера, Германия

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

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

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

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

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

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

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

Компьютерная верстка:

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

Регистрация СМИ: Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 11 ноября 2011 года (Свидетельство ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г. – печатное издание). Первый номер журнала вышел в декабре 2011 года

Периодичность: 4 номера в год

Учредитель и издатель: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес редакции: 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Типография: ИПС ВИТИ НИЯУ МИФИ, 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94

Сайт: <https://glonucsec.elpub.ru>

Тираж: 300 экз.

Цена: Свободная

Подписной индекс: 10647 (объединенный каталог «Пресса России»)

Выход в свет: 26.03.2025



Москва

National Research Nuclear University MEPhI

Nuclear Safety

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

Vol. 15, No. 1, 2025

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Executive Editor:

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

Editorial Staff:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Computer layout:

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

Founded in November, 2011
Quarterly

Founder and Publisher:

Editorial address:

Printing house:

Website:

The circulation is:

The price:

The subscription index is:

Published on:

Reg. № FS77-47155, November, 3 2011

National Research Nuclear University MEPhI

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation

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

<https://glonucsec.elpub.ru>

300 copies

Is free

10647 in the catalogue «Press of Russia»

26.03.2025



Moscow

СОДЕРЖАНИЕ

Том 15, № 1 (54), 2025

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Численная нейтрон-эмиссионная спектрометрия и излучение топлива реактора ВВЭР-1200

С.Д. Полозков, Г.Н. Власкин, С.В. Беденко 5

Результаты моделирования сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в условиях арктических районов Крайнего Севера

Д.А. Припачкин, И.Д. Садофьев 17

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Исследования радиационно-защитных свойств природных минералов Вьетнама

О.Л. Ташлыков, Д.О. Пыльцова, Е.В. Кувишинова, Т.В. Тхыонг, К.А. Махмуд 24

Опыт наладки системы автоматического регулирования турбины К-1200-6,8/50

В.В. Филатов, А.А. Беляков, А.А. Сорокин, А.И. Бодров, А.В. Варзанов, Н.С. Волков 33

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Многоузловая модель динамики реактора ВВЭР-1200 для синтеза системы автоматического регулирования.

С.С. Правосуд 40

Управление старением динамически нагруженных трубопроводов

С.Б. Кравец, М.М. Костикова, С.А. Кузин, А.Ю. Смолин, А.Е. Дембицкий 60

Обоснование значений уровня в парогенераторах с РУ В-392м при нормальной эксплуатации, нарушении нормальной эксплуатации

П.В. Поваров 67

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

Роль и значение управления развитием имиджа атомградов в современных условиях

Т.С. Попова, Н.Д. Задорожняя, А.А. Попов, А.А. Воронов 74

Образовательная экосистема ВИТИ НИЯУ МИФИ как базис его стратегического развития

В.А. Руденко, С.А. Томилин, О.Ф. Цуверкалова, С.В. Волгина, А.В. Анцибор, М.В. Головки 85

Авторский указатель номера 1 (54), 2025 96

CONTENTS

Vol. 15, No 1, 2025

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

Numerical neutron emission spectrometry and radiation of VVER-1200 reactor fuel <i>S.D. Polozkov, G.N. Vlaskin, S.V. Bedenko</i>	5
Simulation results of dry deposition of radioactive aerosols in the Arctic regions of the Far North <i>D.A. Pripachkin, I.D. Sadofev</i>	17

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

Studies of radiation and protective properties of natural minerals in Vietnam <i>O.L. Tashlykov, D.O. Pyltsova, E.V. Kuvshinova, , Ta Van Thuong, K.A. Mahmud</i>	24
Setup experience in commissioning hydraulic control system of turbine K-1200-6,8/50 <i>V.V. Filatov, A.A. Belyakov, A.A. Sorokin, A.I. Bodrov, A.V. Varzanov, N.S. Volkov</i>	33

OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

Multi-node model of VVER-1200 reactor dynamics for automatic control system synthesis <i>S.S. Pravosud</i>	40
Aging management of dynamically loaded pipelines <i>S.B. Kravets, M.M. Kostikova, S.A. Kuzin, A.Y. Smolin, A.E. Dembitskiy</i>	60
Justification of level values in steam generators with V-392m reactor unit during normal operation and normal operation disturbance <i>P.V. Povarov</i>	67

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

Role and significance of atomic city image development management in modern conditions <i>T.S. Popova, N.D. Zadorozhnaya, A.A. Popov, A.A. Voronov</i>	74
Educational ecosystem of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI» as a basis for its strategic development <i>V.A. Rudenko, S.A. Tomilin, O.F. Tsuverkalova, S.V. Volgina, A.V. Antsibor, M.V. Golovko</i>	85

Author Index of 1, 2025	96
-------------------------------	----

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

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

EDN FEMEZE

Оригинальная статья / Original paper



**Численная нейтрон-эмиссионная спектрометрия и излучение
топлива реактора ВВЭР-1200**

С.Д. Полозков^{1,3}  , Г.Н. Власкин², С.В. Беденко¹ 

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация

² ЧУ ИТЦП «Прорыв», г. Москва, Российская Федерация

³ Нововоронежская АЭС – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Российская Федерация

 PolozkovSD@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Аннотация. Для длительной и безаварийной работы реактора топливо модифицируют путем добавления различных гомогенных и гетерогенных соединений. Практическое применение получило уран-гадолиниевое топливо в гомогенном исполнении с аксиальным профилированием тепловыделяющих элементов. Исследуется возможность гетерогенного применения Gd_2O_3 , ZrB_2 , Am_2O_3 и других выгорающих и легирующих добавок, которые позволяют сохранить теплопроводность топлива на уровне обычного оксидного топлива. Исследуемые модификации показывают удовлетворительное поведение под облучением при экстремально высокой температуре и предельном выгорании. Однако менее изученными остаются вопросы радиационной безопасности при обращении как со свежим, так и с отработавшим топливом. В настоящей работе проведена расчетная оценка нейтронной составляющей радиационных характеристик UO_2 -композиции с гетерогенным вариантом локализации микрокапсул $^{nat}Gd_2O_3$ и Am_2O_3 . Такой вариант исполнения не ухудшает теплопроводность топлива и положительно сказывается на ядерно-физических и теплофизических свойствах. Америций исследован не только в качестве возможной альтернативы Gd, но и с позиции утилизации в тепловых реакторах. Рассмотрено влияние Am на фотонную составляющую радиационных характеристик свежего топлива. Исследования выполнены с целью разработки процедур и регламентов обращения с новым топливом в процессе его изготовления и после облучения в реакторе. Исследования выполнены с применением верифицированных расчетных кодов программ Nedis-2m и MCNP 6.2.

Ключевые слова: реактор ВВЭР-1200, нейтронная спектрометрия, (α , n)-реакция, Nedis-2m, америций, фотонное излучение.

Для цитирования: Полозков С.Д., Власкин Г.Н., Беденко С.В. Численная нейтрон-эмиссионная спектрометрия и излучение топлива реактора ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):5–16. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-01>

For citation: Polozkov S.D., Vlaskin G.N., Bedenko S.V. Numerical neutron emission spectrometry and radiation of VVER-1200 reactor fuel. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):5–16. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-01>

Numerical neutron emission spectrometry and radiation of VVER-1200 reactor fuel

Sergey D. Polozkov^{1,3}  , Gennadiy N. Vlaskin², Sergey V. Bedenko¹ 

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² ITCP «Proryv», Moscow, Russian Federation

³ Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC,

Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation

 PolozkovSD@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract. The VVER-1200 (V-491) reactor is a water-cooled power reactor, the design of which provides for higher fuel and coolant operating parameters compared to the VVER-1000 (V-320) reactor. For long-term and trouble-free operation of the reactor, the fuel is modified by adding various homogeneous compounds and heterogeneous inclusions.

Uranium-gadolinium fuel in a homogeneous design with axial profiling of fuel elements has received practical application. The possibility of heterogeneous use of Gd_2O_3 , ZrB_2 , Am_2O_3 and other burnable and alloying additives is being investigated. Such additives make it possible to maintain the thermal conductivity of the fuel at the level of conventional oxide fuel. The studied modifications show satisfactory behavior under irradiation at extremely high temperatures and burnup. However, the issues of radiation safety when handling both fresh and spent fuel remain less studied. In this work, a computational assessment of the neutron component of the radiation characteristics of a UO_2 composition with a heterogeneous variant of the localization of $^{nat}Gd_2O_3$ and Am_2O_3 microcapsules was carried out. This design option does not impair the thermal conductivity of the fuel and has a positive effect on the nuclear physical and thermophysical properties of the fuel. Americium has been studied not only as a possible alternative to Gd, but also from the perspective of its possible utilization in thermal reactors. The influence of Am on the photon component of the radiation characteristics of fresh fuel is considered. It is concluded that the radiation safety of fresh and irradiated products containing Am should be achieved primarily by solving problems of protection from photon radiation. The research is carried out to develop procedures and regulations for handling new fuel during its manufacture and after irradiation in the reactor. The studies were carried out using verified calculation codes of the MCNP 6.2 and Nedis 2m programs.

Keywords: VVER-1200 reactor, computational neutron spectrometry, (α , n)-reaction, Nedis-2m, americium, photon radiation.

Введение

Топливо действующих и проектируемых ядерных реакторов работает в экстремальных условиях. Для длительной и безотказной эксплуатации реактора топливо модифицируют, легируя различными гомогенными соединениями и гетерогенными включениями (B, Be, Mg, Mo, Al, Si, Gd, Er, Eu, Hf и др.), улучшая, таким образом, радиационную и термодинамическую стойкость топлива, теплопроводность, теплофизические и ядерно-физические характеристики. Легирование топлива выгорающими поглотителями (ВП) (Gd, B, Er и др.) позволяет снизить избыточную реактивность, уменьшить перекося радиального и осевого энерговыделения. ВП, так же, как и другие легирующие добавки, используются как в гомогенном [1–4], так и в гетерогенном [1,3–6] варианте. При этом ВП могут не только выполнять свою прямую функцию по снижению избыточной реактивности и профилированию энерговыделения, но и влиять на внутреннюю структуру топлива, теплофизику и ядерно-физические свойства [7,8].

В реакторах типа ВВЭР в качестве ВП применяется гомогенная смесь UO_2 и $^{nat}Gd_2O_3$. Топливные таблетки, состоящие из гомогенной $UO_2-Gd_2O_3$ смеси (уран-гадолиниевое топливо), позволяют снизить концентрацию бора в системе жидкостного регулирования, что положительно сказывается на безопасности и экономической эффективности реактора. Такое уран-гадолиниевое топливо предсказуемо себя

ведет как на ранней стадии эксплуатации, так и в режимах длительной стационарной и переменной нагрузки [1,5,9].

Несмотря на очевидные преимущества гомогенного исполнения ВП, этот вариант приводит к быстрому выгоранию изотопов $^{155,157}Gd$ в твэге, а удлиненный цикл требует повышенного содержания ^{nat}Gd , что, в свою очередь, снижает теплопроводность топлива [1,5,7,8,10,11]. В работе [11] авторы показали, что теплопроводность гомогенной $UO_2-Gd_2O_3$ смеси в интервале рабочих температур, характерных для ВВЭР и средних глубин выгорания, снижена более чем на 17 % по отношению к серийной топливной таблетке. Природный гадолиний является сильнейшим поглотителем, поэтому, несмотря на существующие недостатки, исследования по его применению в реакторах типа ВВЭР продолжаются и в основном направлены на поиск оптимальных компонентов топливной композиции твэлов и твэгов, а также схем их размещения [9,12,13]. Например, здесь [1,2,5] авторами исследуется возможность гетерогенной локализации микрокапсул $^{nat}Gd_2O_3$ в UO_2 -матрице твэга. Анализ имеющихся в научной периодике результатов исследований показывает, что практически все они сконцентрированы на решении таких задач, как повышение ураноемкости топливной таблетки, улучшение ее радиационной и термической стабильности и др. Исследуемые модификации показывают удовлетворительное поведение под облучением при экстремаль-

но высокой температуре и предельном выгорании, но при этом вопросы безопасности при специальном обращении с топливом после эксплуатации практически полностью игнорируются.

В данной работе проводится расчетная оценка нейтронной составляющей радиационных характеристик UO_2 -композиции с гетерогенным вариантом локализации микрокапсул $^{nat}Gd_2O_3$ и Am_2O_3 . Такой вариант исполнения ВП не ухудшает теплопроводность топлива, как это происходит в гомогенной смеси UO_2 и Gd_2O_3/Am_2O_3 , и положительно сказывается на ядерно-физических и теплофизических свойствах топлива и активной зоны.

В работах [1,2,5] авторами продемонстрирована замена традиционно используемой гомогенной $UO_2-Gd_2O_3$ двуокиси на гетерогенный вариант. В этих исследованиях для составов, теплопроводность которых выше, чем у гомогенного аналога, выполнена серия нейтронных расчетов. Полученная зависимость $k_{inf}(t, Z)$ для средних и высоких глубин выгорания идентична эталонной, а нейтронная составляющая радиационных характеристик исследуемых составов оказалась ниже аналогичных характеристик UO_2 -матриц, легированных 9Be , $^{10,11}B$, $^{25,26}Mg$, Mo , ^{27}Al , $^{29,30}Si$. Очевидно, что двуокись, легированная элементами малой и средней массы, обладает рядом преимуществ. Однако некоторые из применяемых изотопов являются целевыми для (α, n) -реакции [14–17] и могут существенно осложнить радиационную обстановку на стадиях открытого и закрытого ядерного топливного цикла [18–23].

На рисунке 1 проиллюстрированы расчетные оценки удельных выходов нейтронов, которые образуются в (α, n) -реакциях на ядрах 9Be , ^{27}Al и $^{29,30}Si$ в сравнении с $^{17,18}O$ (^{nat}O) и их нормированные спектры $\chi_{\alpha n}(E_n)$. Расчеты выполнены в программе Nedis-2m [14] для плоскопараллельного моноэнергетического тока α -частиц интенсивностью 10^6 с^{-1} . Энергия α -частиц принята равной $\langle E \rangle = 5,15 \text{ МэВ}$ и соответствует средневзвешенной энергии спектра источника α -частиц отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) (выгорание $\sim 60 \text{ ГВт}\cdot\text{сут/т U}$, вы-

держка 1 год, удельная активность $2,59 \cdot 10^{15} \text{ Бк/ТВС}$ (масса топлива в топливной сборке (ТВС) – 534,1 кг), выход α -частиц $Y_\alpha(E) = 0,218 \text{ (Бк}\cdot\text{с)}^{-1}$) реактора ВВЭР-1200. Результаты расчета основных характеристик спектральных распределений (спектров) нейтронов $\varphi_{\alpha n}(E)$, анализируемых модификаций для $Y_\alpha = 0,218$, сведены в таблицу 1.

Результаты предварительных расчетных оценок (рис. 1, табл. 1) показывают, что выход нейтронов в реакциях (α, n) на ядрах 9Be и его спектр значительно «жестче» по сравнению с $^{17,18}O$, ^{27}Al и $^{29,30}Si$. Выход и (α, n) -спектр также превышает выход и спектр нейтронов спонтанного деления ^{244}Cm , который является основным источником нейтронов в ОЯТ реакторов типа ВВЭР [17,18,21]. Поэтому, нами сознательно исключены составы UO_2 -матриц, содержащие элементы малой и средней атомной массы. В работе выполнено моделирование нейтронно-физических характеристик ТВС реактора ВВЭР-1200. Проанализирован изотопный состав α -излучателей и источников нейтронного излучения. Проведена расчетная оценка нейтронной составляющей радиационных характеристик ОЯТ с гетерогенным вариантом локализации $^{nat}Gd_2O_3$ и Am_2O_3 . Америций рассмотрен не только как возможная альтернатива Gd, но и с позиции его возможной утилизации в реакторе. Также изучено влияние Am на фотонную составляющую радиационных характеристик свежего топлива. Сделан вывод о том, что радиационная безопасность свежих и облученных изделий с Am (топливных таблеток, твэл, ТВС) должна достигаться в первую очередь решением задач защиты от фотонного излучения.

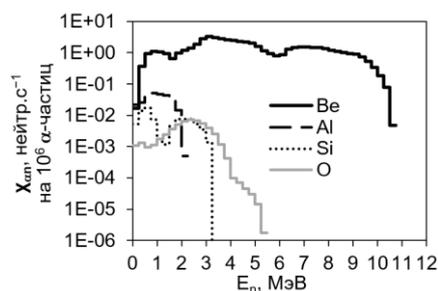


Рисунок 1. Нормированные спектры нейтронов целевых для (α, n) -реакции изотопов
Figure 1. Normalized neutron spectra of target isotopes for (α, n) -reaction

Таблица 1. Радиационные характеристики спектральных распределений нейтронов
Table 1. Radiation characteristics of spectral distributions of neutrons

Изотоп	${}^9\text{Be}$	${}^{27}\text{Al}$	${}^{29,30}\text{Si}$	${}^{17,18}\text{O}$ (UO_2)	${}^{244}\text{Cm}$ нейтр. сп.-деления
Y_n , нейтр.с $^{-1}$	$1,308 \cdot 10^9$	$6,490 \cdot 10^6$	$1,922 \cdot 10^6$	$3,315 \cdot 10^5$	$5,773 \cdot 10^6$
$\langle E \rangle$, МэВ	4,787	0,992	1,318	2,510	2,109
$E_{\text{макс}}$, МэВ	10,75	2,25	3,5	6,5	~12

Нейтронно-физический расчет и расчет изотопного состава топлива выполнены в программе MCNP 6.2, расчет источников излучения и их спектров – в Nedis-2m [14].

Исследования были проведены с целью разработки процедур и регламентов обращения с новым топливом в процессе его изготовления и после облучения в реакторе.

Методы исследований

Задача расчета нейтронной компоненты радиационных характеристик ОЯТ решалась путем совместного использования программ Nedis-2m и MCNP 6.2. Расчет выполнен в два этапа. На первом этапе получены зависимости $k_{\text{inf}}(t, Z)$ и нуклидный состав топлива, проанализирован изотопный состав топлива, состав α -излучателей и источников нейтронов. На втором этапе подготовленные наборы данных о концентрациях и источнике α -частиц использовались в Nedis-2m для воспроизводства выходов $Y_n(E)$, спектров $\chi_n(E)$, $\varphi_n(E)$ и последующего расчета мощности эффективной эквивалентной дозы P (для точечной геометрии источника).

Дозовый коэффициент перехода от $\varphi_n(E)$ к P определялся по уравнению (1):

$$DF(E) = \frac{\int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} h_E(E) \varphi_n(E) dE}{\int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \varphi_n(E) dE}, \quad (1)$$

$3\text{В} \times \text{ч}^{-1}/\text{н.}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}),$

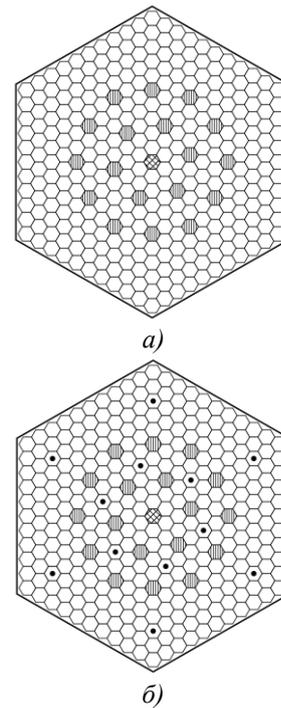
где $h_E(E)$ – зависимость эффективной эквивалентной дозы нейтронов от энергии на единичный поток.

Расчетная модель ТВС для MCNP 6.2

Нейтронно-физический расчет и расчет нуклидного состава топлива выполнены по программе MCNP 6.2, которая использует библиотеку оцененных ядерных констант ENDF/BVII.0 для решения уравнений переноса частиц по объему ТВС. В расчете

разыгрывалось 10^7 историй, что позволило обеспечить среднеквадратичную погрешность полученных решений, равную 0,1%.

Расчетная модель (рис. 2) ТВС реактора ВВЭР-1200 (В-491) выполнена в трехмерной постановке с сохранением размерно-массовых параметров сборки, указанных в проектной документации, и предназначена для определения нейтронно-физических характеристик реактора и нуклидного состава топлива.



⊗ – Ячейка с центральной трубкой
 ⊕ – Ячейка с направляющими каналами
 ⬡ – Топливная ячейка (топливо типа U1, U2, MODU2)
 ⬢ – Топливная ячейка с топливом типа UGD3 (твэз)

Рисунок 2. Расчетные модели ТВС реактора ВВЭР-1200: а) ТВС с топливом типа U1 и MODU2; б) ТВС с топливом типа U2 и UGD3

Figure 2. Calculation models of fuel assemblies of the VVER-1200 reactor: a) fuel assemblies with fuel of type U1 and MODU2; b) fuel assemblies with fuel of type U2 and UGD3

Расчет выполнен для трех типов ТВС (см. рис. 2 и табл. 2): 1) ТВС № 1 содержит 312 ТВЭЛ UO_2 с обогащением 4,95 % (топливо типа U1); 2) ТВС № 2 содержит ТВЭЛ с обогащением 4,95 % (топливо типа U2) и

12 ТВЭЛ UO_2 с обогащением 3,6 % + 4,0 % Gd_2O_3 (топливо типа UGD3); 3) ТВС № 3 содержит 312 ТВЭЛ UO_2 с обогащением 4,95 % + 0,2 % AmO_2 (MODU2).

Таблица 2. Входные наборы данных о ядерных концентрациях (данные нормированы на тонну урана начальной загрузки)

Table 2. Input data sets of nuclear concentrations (data are normalized per ton of uranium load)

Изотоп	Концентрация, яд. (барн \times см) ⁻¹			Концентрация, г/тU		
	ТВС № 1	ТВС № 2	ТВС № 3	ТВС № 1	ТВС № 2	ТВС № 3
²³⁴ U	$1,034 \cdot 10^{-5}$	$1,021 \cdot 10^{-5}$	$1,032 \cdot 10^{-5}$	$4,330 \cdot 10^2$	$4,292 \cdot 10^2$	$4,331 \cdot 10^2$
²³⁵ U	$1,163 \cdot 10^{-3}$	$1,149 \cdot 10^{-3}$	$1,161 \cdot 10^{-3}$	$4,890 \cdot 10^4$	$4,853 \cdot 10^4$	$4,901 \cdot 10^4$
²³⁶ U	$5,404 \cdot 10^{-6}$	$5,342 \cdot 10^{-6}$	$5,394 \cdot 10^{-6}$	$2,280 \cdot 10^2$	$2,262 \cdot 10^2$	$2,283 \cdot 10^2$
²³⁸ U	$2,232 \cdot 10^{-2}$	$2,228 \cdot 10^{-2}$	$2,228 \cdot 10^{-2}$	$9,510 \cdot 10^5$	$9,521 \cdot 10^4$	$9,510 \cdot 10^5$
²⁴¹ Am	-	-	$4,386 \cdot 10^{-5}$	-	-	$1,902 \cdot 10^3$
^{242m1} Am	-	-	$1,669 \cdot 10^{-6}$	-	-	$7,251 \cdot 10^1$
²⁴³ Am	-	-	$8,298 \cdot 10^{-7}$	-	-	$3,623 \cdot 10^1$
¹⁶ O	$4,700 \cdot 10^{-2}$	$4,689 \cdot 10^{-2}$	$4,701 \cdot 10^{-2}$	-	-	-

Расчетная модель ТВС для Nedis-2m

Программный код Nedis-2m (NEutron DIStribution) и его последняя модификация Nedis-3 предназначены для расчета выхода и энергетического спектра нейтронов, образующихся в реакциях (α, n) на ядрах легких элементов и нейтронов спонтанного деления, а также фотонов, испускаемых от распада α -излучателей и в реакциях (α, γ) . Nedis-2m позволяет выполнять расчеты:

1) спектрального и нормированного распределения нейтронов в групповом и точечном представлениях;

2) спектра и потока нейтронов утечки, коэффициента пересчета от спектра к мощности эффективной эквивалентной дозы;

3) интенсивности и спектра фотонного излучения для гомогенной смеси α -излучателей и легких элементов. Также предусмотрен учет влияния геометрии источника (пластина, цилиндр, сфера, микросфера, нить) α -излучателей на указанные выше характеристики. В расчетах спектров учитывается анизотропия испускания нейтронов в

системе центра масс реакции (α, n) . Сечения (α, n) -реакций, коэффициенты разложения сечений по полиномам Лежандра, тормозные способности α -частиц берутся из баз данных программы. Библиотека программы содержит данные о сечениях (α, n) -реакций Li, Be, B, C, O, F, Ne, Na Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar и K ядер для энергий α -частиц до 10 МэВ, а также данные о шестидесяти естественных и реакторных α -излучателях [14,24].

В таблицах 3, 4 и на рисунке 3 представлены наборы входных данных о концентрациях и источнике α -частиц (данные нормированы на тонну U начальной загрузки) необлученных (свежих) и облученных ТВС. Параметры облученных ТВС, следующие: время облучения 1468 сут., максимальное выгорание 60 ГВт \times сут/т(U), выдержка 0 сут., выходы $Y_\alpha(E)$ α -частиц ТВС № 1, 2 и 3, соответственно, равны – 0,438, 0,442 и 0,665 (с \times Бк)⁻¹.

Таблица 3. Ядерные концентрации и параметры источника α -частиц необлученных ТВС
Table 3. Nuclear concentrations and parameters of the α -particles source of non-irradiated fuel assemblies

Нуклид	$\langle E \rangle$ МэВ	ТВС № 1		ТВС № 2		ТВС № 3	
		Состав, яд. (барн \times см) ⁻¹	A_{α} , (с \times Т) ⁻¹	Состав, яд. (барн \times см) ⁻¹	A_{α} , (с \times Т) ⁻¹	Состав, яд. (барн \times см) ⁻¹	A_{α} , (с \times Т) ⁻¹
²³⁴ U	4,759	$1,034 \cdot 10^{-5}$	$9,968 \cdot 10^{10}$	$1,021 \cdot 10^{-5}$	$9,876 \cdot 10^{10}$	$1,032 \cdot 10^{-5}$	$9,968 \cdot 10^{10}$
²³⁵ U	4,405	$1,163 \cdot 10^{-3}$	$3,910 \cdot 10^9$	$1,149 \cdot 10^{-3}$	$3,878 \cdot 10^9$	$1,161 \cdot 10^{-3}$	$3,918 \cdot 10^9$
²³⁶ U	4,481	$5,404 \cdot 10^{-6}$	$5,456 \cdot 10^8$	$5,342 \cdot 10^{-6}$	$5,408 \cdot 10^8$	$5,394 \cdot 10^{-6}$	$5,456 \cdot 10^8$
²³⁸ U	4,188	$2,232 \cdot 10^{-2}$	$1,183 \cdot 10^{10}$	$2,228 \cdot 10^{-2}$	$1,184 \cdot 10^{10}$	$2,228 \cdot 10^{-2}$	$1,183 \cdot 10^{10}$
²⁴¹ Am	5,479	-	-	-	-	$4,386 \cdot 10^{-5}$	$2,411 \cdot 10^{14}$
^{242m} Am	5,210	-	-	-	-	$1,669 \cdot 10^{-6}$	$1,290 \cdot 10^{11}$
²⁴³ Am	5,269	-	-	-	-	$8,298 \cdot 10^{-7}$	$2,673 \cdot 10^{11}$
¹⁶ O	-	$4,691 \cdot 10^{-2}$	-	$4,680 \cdot 10^{-2}$	-	$4,692 \cdot 10^{-2}$	-
¹⁷ O	-	$1,782 \cdot 10^{-5}$	-	$1,778 \cdot 10^{-5}$	-	$1,783 \cdot 10^{-5}$	-
¹⁸ O	-	$3,654 \cdot 10^{-8}$	-	$3,645 \cdot 10^{-8}$	-	$3,655 \cdot 10^{-8}$	-
Сумма	-	$4,700 \cdot 10^{-2}$	$1,160 \cdot 10^{11}$	$4,689 \cdot 10^{-2}$	$1,150 \cdot 10^{11}$	$4,701 \cdot 10^{-2}$	$2.416 \cdot 10^{14}$

Таблица 4. Ядерные концентрации и активность актинидов облученных ТВС
Table 4. Nuclear concentrations and activity of actinides in irradiated fuel assemblies

Нуклид	$\langle E \rangle$ МэВ	ТВС №1		ТВС №2		ТВС №3	
		Состав, яд. (барн \times см) ⁻¹	A, Бк \times Т ⁻¹	Состав, яд. (барн \times см) ⁻¹	A, Бк \times Т ⁻¹	Состав, яд. (барн \times см) ⁻¹	A, Бк \times Т ⁻¹
²³³ U	4,817	$6,425 \cdot 10^{-11}$	$9,586 \cdot 10^5$	$6,244 \cdot 10^{-11}$	$9,393 \cdot 10^5$	$6,960 \cdot 10^{-11}$	$1,052 \cdot 10^6$
²³⁴ U	4,759	$4,479 \cdot 10^{-6}$	$4,329 \cdot 10^{10}$	$4,385 \cdot 10^{-6}$	$4,245 \cdot 10^{10}$	$4,820 \cdot 10^{-6}$	$4,633 \cdot 10^{10}$
²³⁵ U	4,405	$8,850 \cdot 10^{-5}$	$2,985 \cdot 10^8$	$8,579 \cdot 10^{-5}$	$2,889 \cdot 10^8$	$9,740 \cdot 10^{-5}$	$3,273 \cdot 10^8$
²³⁶ U	4,481	$1,684 \cdot 10^{-4}$	$1,706 \cdot 10^{10}$	$1,667 \cdot 10^{-4}$	$1,692 \cdot 10^{10}$	$1,680 \cdot 10^{-4}$	$1,696 \cdot 10^{10}$
²³⁸ U	4,188	$2,153 \cdot 10^{-2}$	$1,143 \cdot 10^{10}$	$2,149 \cdot 10^{-2}$	$1,144 \cdot 10^{10}$	$2,150 \cdot 10^{-2}$	$1,138 \cdot 10^{10}$
²³⁸ Pu	5,499	$8,060 \cdot 10^{-6}$	$2,183 \cdot 10^{14}$	$8,081 \cdot 10^{-6}$	$2,192 \cdot 10^{14}$	$2,150 \cdot 10^{-5}$	$5,806 \cdot 10^{14}$
²³⁹ Pu	5,144	$8,391 \cdot 10^{-5}$	$8,257 \cdot 10^{12}$	$8,366 \cdot 10^{-5}$	$8,256 \cdot 10^{12}$	$8,920 \cdot 10^{-5}$	$8,734 \cdot 10^{12}$
²⁴⁰ Pu	5,155	$6,267 \cdot 10^{-5}$	$2,267 \cdot 10^{13}$	$6,293 \cdot 10^{-5}$	$2,276 \cdot 10^{13}$	$6,530 \cdot 10^{-5}$	$2,350 \cdot 10^{13}$
²⁴¹ Pu	4,893	$2,665 \cdot 10^{-5}$	$4,404 \cdot 10^{15}$	$2,662 \cdot 10^{-5}$	$4,412 \cdot 10^{15}$	$2,800 \cdot 10^{-5}$	$4,614 \cdot 10^{15}$
²⁴² Pu	4,918	$2,574 \cdot 10^{-5}$	$1,636 \cdot 10^{11}$	$2,605 \cdot 10^{-5}$	$1,660 \cdot 10^{11}$	$2,910 \cdot 10^{-5}$	$1,843 \cdot 10^{11}$
²³⁷ Np	4,759	$1,650 \cdot 10^{-5}$	$1,831 \cdot 10^{10}$	$1,645 \cdot 10^{-5}$	$1,825 \cdot 10^{10}$	$1,670 \cdot 10^{-5}$	$1,848 \cdot 10^{10}$
²⁴¹ Am	5,479	$6,419 \cdot 10^{-7}$	$3,522 \cdot 10^{12}$	$6,371 \cdot 10^{-7}$	$3,502 \cdot 10^{12}$	$9,800 \cdot 10^{-7}$	$5,357 \cdot 10^{12}$
^{242m} Am	5,210	$3,148 \cdot 10^{-9}$	$5,300 \cdot 10^{10}$	$3,126 \cdot 10^{-9}$	$5,272 \cdot 10^{10}$	$4,950 \cdot 10^{-9}$	$8,303 \cdot 10^{10}$
²⁴³ Am	5,269	$4,997 \cdot 10^{-6}$	$1,611 \cdot 10^{12}$	$5,084 \cdot 10^{-6}$	$1,646 \cdot 10^{12}$	$6,570 \cdot 10^{-6}$	$2,119 \cdot 10^{12}$
²⁴² Cm	6,100	$5,392 \cdot 10^{-7}$	$2,869 \cdot 10^{15}$	$5,447 \cdot 10^{-7}$	$2,901 \cdot 10^{15}$	$1,480 \cdot 10^{-6}$	$7,856 \cdot 10^{15}$
²⁴⁴ Cm	5,795	$2,377 \cdot 10^{-6}$	$3,111 \cdot 10^{14}$	$2,448 \cdot 10^{-6}$	$3,213 \cdot 10^{14}$	$4,550 \cdot 10^{-6}$	$5,964 \cdot 10^{14}$
Сумма	-	-	$7,839 \cdot 10^{15}$	-	$7,889 \cdot 10^{15}$	-	$1,369 \cdot 10^{16}$

Интегральные параметры источника α -частиц, исследуемых ТВС (данные нормированы на тонну U начальной загрузки) для 0, 1, 2, 3, 5 и 7 лет выдержки, проиллюстрированы на рисунке 3.

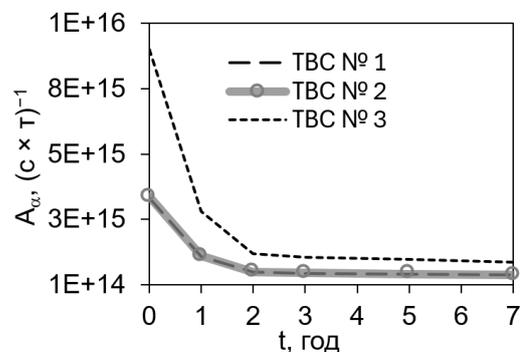


Рисунок 3. Интегральные параметры источника α -частиц в зависимости от времени выдержки ОЯТ
Figure 3. Integral parameters of the α -particle source depending on the SNF holding time

Результаты и обсуждения

В разделе демонстрируются: 1) результаты моделирования нейтронно-физических и радиационных характеристик ТВС разных типов, 2) изотопный состав α -излучателей, источники нейтронов и 3) их спектры.

Нейтронно-физические характеристики

Результаты расчета нейтронно-физических характеристик ТВС № 1 (топливо типа U1) и 2 (топливо типа U2 и UGD3), продемонстрированные на рисунке 4, показывают уменьшение коэффициента размножения $k_{inf}(Z)$, характерное для ТВС с обычным и уран-гадолиниевым топливом.

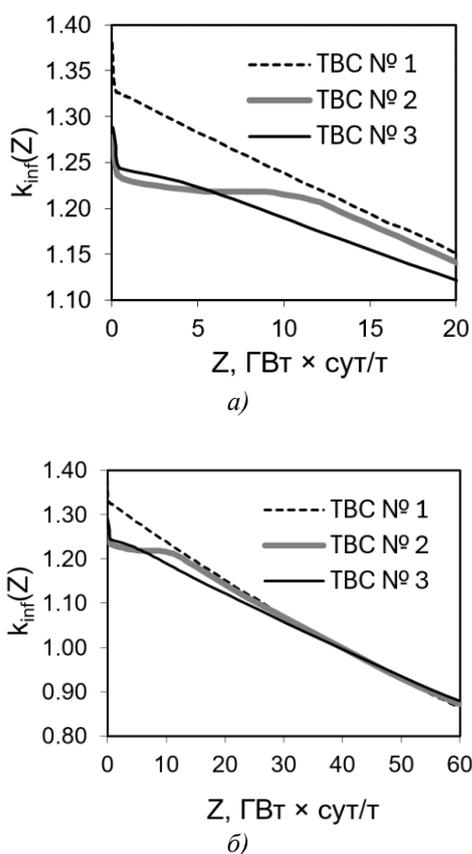


Рисунок 4. Зависимость $k_{inf}(Z)$ от глубины выгорания ядерного топлива

Figure 4. Dependence of $k_{inf}(Z)$ on the burnup of nuclear fuel

Зависимость $k_{inf}(Z)$ ТВС № 3 (топливо типа MODU2) также демонстрирует характерное изменение нейтронно-физических характеристик как в начале цикла облучения (рис. 4а), так и при продолжительном облучении (рис. 4б). Наблюдаемое уменьшение начального запаса реактивности в сравнении

с ТВС № 1 и 2, позволяет сделать вывод о возможном применении гетерогенного варианта локализации Am_2O_3 в UO_2 для компенсации избыточной реактивности.

Радиационные характеристики

Составы свежих и облученных ТВС № 1 и ТВС № 2 (усредненный состав по объему сборки) практически идентичны, поэтому ниже анализируются и сравниваются радиационные характеристики ТВС № 1 с топливом типа U1 и ТВС № 3 с топливом типа MODU2.

На рисунке 5 продемонстрированы нормированные спектры нейтронов $\chi_n(E)$ (рис. 5а) и их спектральные распределения $\varphi_n(E)$ (рис. 5б) ТВС № 1. Интегральный выход нейтронов Y_n свежей ТВС (в пересчете на массу топлива (~534,1 кг UO_2) в ТВС), равен $5,90 \times 10^3$ нейтр. c^{-1} , мощность эффективной эквивалентной дозы $P=0,08$ мкЗв \times ч $^{-1}$ (на расстоянии 10 см в среднем сечении ТВС), вклад (α, n)-нейтронов ($Y_{\alpha n}/Y_{sf}$) равен 0,1103 (~11,03 %). На конец облучения и для двух лет выдержки Y_n составит величину, равную $7,18 \times 10^8$ и $4,37 \times 10^8$ нейтр. c^{-1} , соответственно. Вклад (α, n)-нейтронов с 6,65 % (конец облучения) уменьшается до 1,36 % (выдержка 2 года), далее эта составляющая нейтронного излучения во времени практически не меняется.

Спектральные (рис. 6) и интегральные ($Y_n = 2,14 \times 10^6$ нейтр. c^{-1} , $P = 37$ мкЗв \times ч $^{-1}$, $Y_{\alpha n}/Y_{sf} = 278$) параметры свежей ТВС № 3 заметно отличаются от аналогичных параметров ТВС № 1 и 2 (рис. 5).

Здесь $\chi_n(E)$ и Y_n в диапазоне энергий от 10^{-7} до 6 МэВ практически полностью формируются нейтронами, образующимися в ядрах Am_2O_3 по реакциям (α, n). На конец облучения и для двух лет выдержки Y_n составит величину, равную $1,57 \times 10^9$ нейтр. c^{-1} ($Y_{\alpha n}/Y_{sf}=8,27$ %) и $8,40 \times 10^8$ нейтр. c^{-1} ($Y_{\alpha n}/Y_{sf}=1,53$ %), соответственно.

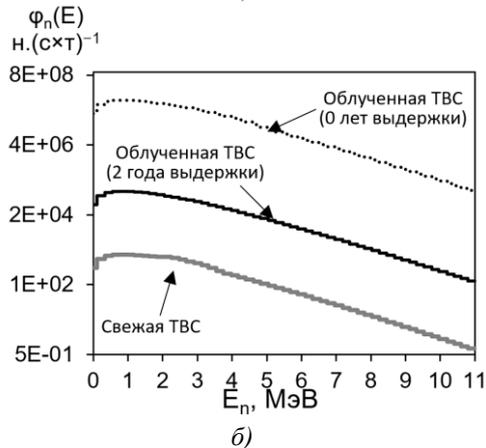
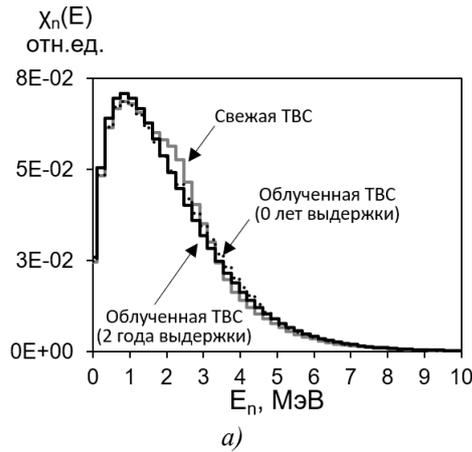


Рисунок 5. Нейтронная составляющая радиационных характеристик ТВС № 1: а – нормированные спектры; б – спектральные распределения
Figure 5. Neutron component of FA № 1 radiation characteristics: а – normalized spectra; б – spectral distributions

Результаты сравнений радиационных характеристик свежих ТВС показали, что значение $Y_n(\text{ТВС № 3})$ в $3,7 \cdot 10^2$ раза больше соответствующих значений ТВС № 1 и 2. Спектральное распределение нейтронов преимущественно формируется (α, n)-нейтронами со средней энергией спектра 2,48 МэВ и максимумом в области – 2,68 МэВ.

Анализ радиационных характеристик свежего уранового топлива требует учета тормозного излучения при распаде ^{234m}Pa и ^{234}Th . Выполненный в Nedis-3 расчет источника фотонного излучения свежих ТВС с учетом тормозного излучения от распада ^{234m}Pa ($\sim 4,6 \cdot 10^{-10}$ г/тУ) и ^{234}Th ($\sim 1,38 \cdot 10^{-5}$ г/тУ) показал, что выход фотонов ТВС № 3 составляет $Y_\gamma \sim 10^{14}$ фотон.с $^{-1}$, что в $\sim 10^4$ раз превышает аналогичные значения для ТВС № 1 и 2.

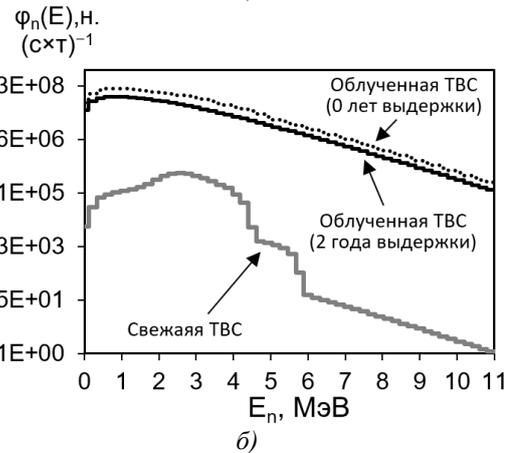
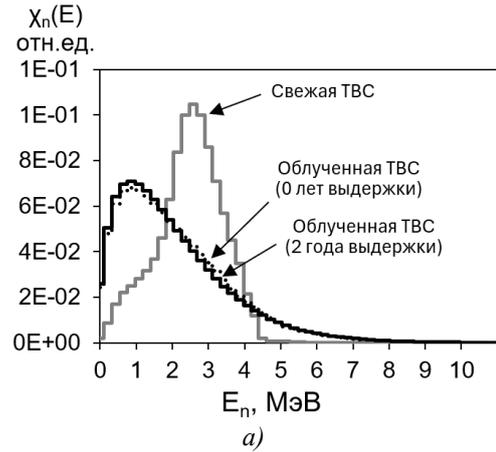


Рисунок 6. Нейтронная составляющая радиационных характеристик ТВС № 3: а – нормированные спектры; б – спектральные распределения
Figure 6. Neutron component of FA № 3 radiation characteristics: а – normalized spectra; б – spectral distributions

Результаты расчета мощности дозы нейтронного и фотонного излучений свежих ТВС в сравнении на момент их изготовления продемонстрированы в таблице 5.

Таблица 5. Мощность эффективной эквивалентной дозы нейтронного и фотонного излучений свежих ТВС

Table 5. Power of effective equivalent dose of neutron and photon radiation of unirradiated fuel assemblies

Расстояние от ТВС, см	ТВС № 1		ТВС № 3	
	Нейтроны мкЗв \times ч $^{-1}$	Фотоны мкЗв \times ч $^{-1}$	Нейтроны мкЗв \times ч $^{-1}$	Фотоны мкЗв \times ч $^{-1}$
0	0,302	2,710	140	480
10	0,081	0,641	37	102
20	0,063	0,501	29	85
40	0,044	0,371	20	64
60	0,033	0,280	15	50
80	0,026	0,231	12	41
100	0,021	0,181	9.5	35

Нейтронная компонента облученных изделий сведена в таблицу 6.

Таблица 6. Нейтронная компонента радиационных характеристик, облученных ТВС

Table 6. Neutron component of irradiated fuel assemblies radiation characteristics

Время выдержки ТВС, год	ТВС №1		ТВС №3	
	нейтр. с ⁻¹	МЗв × ч ⁻¹	нейтр. с ⁻¹	МЗв × ч ⁻¹
0	7,175·10 ⁸	7,003	1,566·10 ⁹	15,33
2	4,373·10 ⁸	4,229	8,403·10 ⁸	8,128
3	3,838·10 ⁸	3,712	7,358·10 ⁸	7,117
5	3,172·10 ⁸	3,068	6,079·10 ⁸	5,880
7	2,427·10 ⁸	2,347	4,647·10 ⁸	4,495

Следует отметить, что основной вклад в погрешность расчетного определения найденных значений радиационных характеристик (табл. 6) вносит неопределенность в определении ядерных концентраций следующих изотопов [21,25]: ^{238,239,240,241,242}Pu, ²³⁷Np, ^{241,242m}Am, ^{242,244,246}Cm.

Проведенные в работе [21] исследования показали, что большинство современных программных кодов «занижают» значения концентраций ядер младших актиноидов (Np, Am, Cm) на 20-30 %. Соответственно, найденные значения выходов и мощности дозы также могут оказаться занижены на 20-30 %.

Заключение

В работе проведена расчетная оценка нейтронно-физических и радиационных характеристик ТВС различных типов реактора ВВЭР-1200 (В-491), исследован изотопный состав α-излучателей, источников нейтронов и их спектров. Основное внимание было уделено исследованию UO₂-композиции с гетерогенным вариантом размещения микрокапсул ^{nat}Gd₂O₃ и Am₂O₃. Такой вариант исполнения не ухудшает теплопроводность топлива, как это происходит в случае гомогенного аналога, и положительно сказывается

на ядерно-физических и теплофизических свойствах топлива и активной зоны.

Результаты нейтронно-физических исследований (рис. 4) позволяют сделать вывод о возможном применении гетерогенного варианта локализации Am₂O₃ в UO₂-матрице (ТВС № 3) для компенсации избыточной реактивности.

Сравнительный анализ радиационных характеристик свежих ТВС показывает существенное превышение как нейтронной, так и фотонной составляющей ТВС № 3 по сравнению с урановым (ТВС № 1) и урангадолиниевым (ТВС № 2) топливом. Выход и спектр нейтронной компоненты формируется в основном по реакциям (α, n) в микрокапсулах Am₂O₃ (рис. 6), а при расчете мощности дозы необходимо учитывать особенности формирования спектрального распределения нейтронов.

Нормированные спектры нейтронов облученных ТВС исследуемых типов практически идентичны и аппроксимируются функцией Уатта (рис. 5 и 6). Выход и мощность дозы ТВС № 3 превышает соответствующие значения для ТВС № 1 и 2, но не более чем в два раза (табл. 6). Этот результат позволяет рассматривать Am не только в качестве возможной альтернативы Gd, но и с позиции его утилизации в тепловых реакторах.

Влияние Am на фотонную составляющую радиационных характеристик свежего топлива исследовано с учетом тормозного излучения от распада ^{234m}Pa и ²³⁴Th. Предварительные результаты (табл. 5) позволяют сделать вывод о том, что радиационная безопасность свежих и облученных изделий с Am (топливные таблетки, твэл, ТВС) должна достигаться в первую очередь, решением задач защиты от фотонного излучения.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 23-29-00131 (<https://rscf.ru/project/23-29-00131/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Minato K., Shiratori T., Serizawa H., Hayashi K. et al. Thermal conductivities of irradiated UO_2 and $(\text{U,Gd})\text{O}_2$. *Journal of nuclear materials*. 2001;288(1):57–65. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(00\)00578-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00578-X)
2. Shelley A., Ovi M.H. Use of americium as a burnable absorber for VVER-1200 reactor. *Nuclear engineering and technology*. 2021;53(8):2454–2463. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.024>
3. Панов В.С., Лопатин В.Ю., Мякишева О.В., Еремеева Ж.В. и др. Оценка использования модифицирующих добавок для повышения производительности ядерного топлива в реакторе. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2017;21(2):48–59; <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-2-48-59>
Panov V.S., Lopatin V.Y., Myakisheva O.V., Eremeeva J.V. et al. REVIEW OF MODIFYING AGENTS USE TO IMPROVE NUCLEAR FUEL PERFORMANCE IN THE REACTORE CORE. *Proceedings of the Southwest State University*. 2017;21(2):48–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-2-48-59>
4. Карпюк Л.А., Савченко А.М., Коновалов Ю.В., Кулаков Г.В. и др. Особенности поведения дисперсионного топлива МЕТМЕТ под облучением. *Вопросы материаловедения*. 2022;3(111):148–155. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-111-3-148-155>
Karyuk L.A., Savchenko A.M., Kononov Yu.V., Kulakov G.A. et al. Features of the behavior of the dispersion fuel METMET under irradiation. *Voprosy materialovedeniya*. 2022;(3(111)):148–155. (In Russ.). <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-111-3-148-155>
5. Tran H.M. et al. Neutronics design of VVER-1000 fuel assembly with burnable poison particles. *Nuclear engineering and technology*. 2019;51(7):1729–1737. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.05.026>
6. Al'davakhra S., Savander V.I., Belousov I.N. Computational method for and analysis of the application of granular absorbers in VVER reactors. *Atomic energy*. 2006;100:8–13. <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0042-3>
7. Андрианов А.Н., Баранов В.Г., Годин Ю.Г. Круглов В.А., Тенишев А.В. Влияние нестехиометрии и легирования на теплопроводность диоксида урана. *Перспективные материалы*. 2003;6:43–49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21260464> (дата обращения: 11.11.2024).
Andrianov A.N., Baranov V.G., Godin Yu.G., Kruglov V.B., Tenishev A.V. Effect of nonstoichiometry and alloying on thermal conductivity of uranium dioxide. *Journal of advanced materials*. 2003;6:43–49. (in Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21260464> (accessed: 11.11.2024).
8. Баранов В.Г., Покровский С.А., Тенишев А.В., Хлунов А.В. Михеев Е.Н., Федотов А.В. Теплофизические свойства модифицированного оксидного ядерного топлива. *Атомная энергия*. 2011;110(1):36–40. Режим доступа: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/download/1988/1968> (дата обращения: 11.11.2024).
Baranov V.G., Pokrovskii S.A., Tenishev A.V., Khlunov A.V., Mikheev E.N., Fedotov A.V. Thermophysical properties of modified oxide nuclear fuel. *Atomic energy*. 2011;110:45–50. (in Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9389-1>
9. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлиненных кампаниях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;2(43):42–54. <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;85(2):88–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>
10. Noai-Nam Tran, et al. Feasibility of using Gd_2O_3 particles in VVER-1000 fuel assembly for controlling excess reactivity. *Energy Procedia*. 2017;131:29–36. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.442>
11. Iwasaki K., Matsui T., Yanai K., Yuda R. et al. Effect of Gd_2O_3 Dispersion on the Thermal Conductivity of UO_2 . *Nuclear science and technology*. 2009;46(7):673–676; <https://doi.org/10.1080/18811248.2007.9711574>
12. Внуков Р.А., Колесов В.В., Жаворонкова И.А., Котов Я.А., Праманик М.М. Влияние размещения выгорающего поглотителя на нейтронно-физические характеристики тепловыделяющей сборки ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;2:27–37. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.03>
Vnukov R.A., Kolesov V.V., Zhavoronkova I.A., Kotov Ya.A., Pramanik M.M. Effect of the Burnable Absorber Arrangement on the VVER-1200 Fuel Assembly Neutronic Performance. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2021;2:27–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.03>
13. Карпеева А.Е., Колосовский В.Г., Пахомов Д.С., Скморуха А.Е., Тимошин И.С. Способ оптимизации термической стабильности уран-гадолиниевое топлива. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;3:97–106. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.3.08>
Karpeeva A.E., Kolosovskiy V.G., Pakhomov D.S., Skomorokha A.E., Timoshin I.S. A Method to Optimize the Thermal Stability of Uranium-Gadolinium Fuel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2021;3:97–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2021.3.08>
14. Vlaskin G.N., Khomyakov Y.S. (α, n) Neutron spectra on thick light target. *Atomic energy*. 2021;130:104–118. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00781-0>
15. Vlaskin G.N., Khomyakov Y.S. Calculation of Neutron Production Rates and Spectra from Compounds of Actinides and Light Elements. *The European Physical journal conferences*. 2017;153(5):07033; <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715307033>

16. Vlaskin G.N., Khomyakov Y.S., Bulanenko V.I. Neutron yield of the reaction (α, n) on thick targets comprised of light elements. *Atomic energy*. 2015;117:357–365. <https://doi.org/10.1007/s10512-015-9933-5>

17. Власкин Г.Н., Чванкин Е.В., Даренских О.Г., Дзекун Е.Г., Маркин Е.Г. Контроль выгорания топлива по собственному нейтронному излучению отработавших ТВС. *Атомная энергия*. 1993;74(5):437–438. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t74-5_1993/p437/ (дата обращения: 11.11.2024).

Vlaskin G.N., Chvankin E.V., Darenskiikh O.G., Markin E.G., Parfent'ev E.A. Fuel-burnup monitoring based on the characteristic neutron radiation of spent fuel assemblies. *Atomic energy*. 1993;74: 399–401. (in Russ.). <https://doi.org/10.1007/BF00844629>

18. Власкин Г.Н., Матвеев Л.В., Рогожкин В.Ю., Сидоренко В.Д. Нейтронное излучение отработавшего топлива ВВЭР-1000. *Атомная энергетика*. 1989;67(3):219–220. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t67-3_1989/p219/ (дата обращения: 11.11.2024).

Vlaskin G.N., Matveev L.V., Rogozhkin V.Yu., Sidorenko V.D. Neutron emission from spent VVÉR-1000 fuel. *Soviet atomic energy*. 1989;67:703–705. (in Russ.). <https://doi.org/10.1007/BF01123216>

19. Шаманин И.В., Буланенко В.И., Беденко С.В. Neutron radiation field of irradiated ceramic nuclear fuel of various types. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2010;2:97–103. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14933427> (дата обращения: 11.11.2024).

Shamanin I.V., Bulanenko V.I., Bedenko S.V. Effect of nonstoichiometry and alloying on thermal conductivity of uranium dioxide. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2010;2:97–103. (in Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=14933427> (accessed: 11.11.2024).

20. Bedenko S, Shamanin I, Grachev V, Knyshev V, Ukrainets O, Zorkin A. Neutron radiation characteristics of the IVth generation reactor spent fuel. *AIP Conference proceedings*. 2018;1938(1):020001. <https://doi.org/10.1063/1.5027208>

21. Шаманин И.В., Беденко С.В., Павлюк А.О., Лызко В.А. Использование программы Origen-Arp при расчете изотопного состава отработанного топлива реактора ВВЭР-1000. *Известия томского политехнического университета*. 2010;317(4):25–28. Режим доступа: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3408/1/bulletin_tpu-2010-317-4-05.pdf (дата обращения: 11.11.2024).

Shamanin I.V., Bedenko S.V., Pavljuk A.O., Lyzko V.A. Using the Origen-Arp program to calculate the isotopic composition of spent fuel from the VVER-1000 reactor. *Izvestiya tomского politehnicheskogo universiteta*. 2010;317(4):25–28. (in Russ.). Available at: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/3408/1/bulletin_tpu-2010-317-4-05.pdf (accessed: 11.11.2024).

22. Plevaka M.N., Bedenko S.V., Gubaidulin I.M., Knyshev V.V. Neutron-physical studies of dry storage systems of promising fuel compositions. *Bulletin of the Lebedev Physics institute*. 2015;42:240–243. <https://doi.org/10.3103/S1068335615080059>

23. Шаманин И.В., Беденко С.В., Нестеров В.Н., Луцик И.О., Прец А.А. Решение системы многогрупповых уравнений переноса нейтронов в подкритических системах. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2017;2017(4):38–49. <https://doi.org/10.26583/npe.2017.4.04>

Shamanin I.V., Bedenko S.V., Nesterov V.N., Lutsik I.O., Prets A.A. Solution of neutron-transport Multigroup equations system in subcritical systems Solution of neutron-transport Multigroup equations system in subcritical systems. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2017;2017(4):38–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2017.4.04>

24. Vlaskin G.N., Bedenko S.V., Ghal-Eh N., Vega-Carrillo H.R. Neutron yield and energy spectrum of $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reaction in liquid scintillator of KamLAND: A Nedis-2m simulation. *Nuclear engineering and technology*. 2021;53(12):4067–4071. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.06.023>

25. Писарев А.Н., Колесов В.В. Исследование переноса неопределенностей в ядерных данных на ядерные концентрации нуклидов в расчетах выгорания. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2020;2:108–121. <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.10>

Pisarev A.N., Kolesov V.V. A study into the propagation of the uncertainties in nuclear data to the nuclear concentrations of nuclides in burn-up calculations. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2020;2:108–121. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.10>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Полозков С.Д. – обзор и редактирование, визуализация, исследование;

Власкин Г.Н. – программное обеспечение, концептуализация, верификация, формальный анализ, исследование;

Беденко С.В. – написание текста и редактирование, методология, программное обеспечение, верификация, исследование.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Polozkov S.D. – review & editing, visualization, investigation;

Vlaskin G.N. – software, conceptualization, validation, formal analysis, investigation;

Bedenko S.V. – writing – review & editing, methodology, software, validation, investigation.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00131 (<https://rscf.ru/project/23-29-00131/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Полозков Сергей Дмитриевич, инженер отдела ядерной безопасности и надежности, Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж; аспирант, Томский Политехнический Университет, г. Томск, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-7938-4208>

e-mail: PolozkovSD@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Власкин Геннадий Николаевич, научный сотрудник научного отдела, ЧУ ИТЦП «Прорыв», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: GNVlaskin@rosatom.ru.

Беденко Сергей Владимирович, доцент инженерной школы ядерных технологий, Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-4318-6338>

e-mail: bedenko@tpu.ru.

FUNDING:

This research was supported by the RSF through grant No. 23-29-00131 (<https://rscf.ru/en/project/23-29-00131/>)

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey D. Polozkov, engineer of nuclear safety and reliability department, Novovoronezh NPP, Novovoronezh; postgraduate student, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-7938-4208>

e-mail: PolozkovSD@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Gennady N. Vlaskin, researcher at the science department, ИТЦП «Прорыв», Moscow, Russian Federation.

e-mail: GNVlaskin@rosatom.ru

Sergey V. Bedenko, Associate Professor, a School of Nuclear Science and Engineering, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-4318-6338>

e-mail: bedenko@tpu.ru

Поступила в редакцию / Received 06.12.2024

После доработки / Revision 03.03.2025

Принята к публикации / Accepted 06.03.2025

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-02>

EDN KRCFHR

Оригинальная статья / Original paper



Результаты моделирования сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в условиях арктических районов Крайнего Севера

Д.А. Припачкин  , И.Д. Садофьев

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

 DAPripachkin@mephi.ru

Аннотация. Представлено моделирование сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в арктических районах Крайнего Севера с использованием модели сухого осаждения аэрозолей на неоднородные подстилающие поверхности, которая учитывает влияние размеров и плотности аэрозольных частиц, характеристик шероховатости поверхности и динамической скорости трения, определяемой на основе параметризации пограничного и приземного слоя в использованной версии модели WRF-ARW. Получены оценки загрязнения поверхности земли радиоактивными аэрозолями с размерами частиц 0,1, 1 и 10 мкм в арктических районах Крайнего Севера (территории п-ова Ямал и Кольского п-ова) с неоднородными подстилающими поверхностями в реальных метеорологических условиях в летний и зимний периоды. Показано, что загрязнение радиоактивными аэрозолями поверхности земли на территории п-ова Ямал и Кольского п-ова зависит от размеров аэрозольных частиц и типов подстилающей поверхности в летний и зимний периоды. Наибольшая неоднородность загрязнения территории и ее зависимость от типа подстилающей поверхности наблюдается для частиц менее 1 мкм, а для частиц больших размеров определяющими факторами являются рельеф местности и метеорологические условия во время выброса. Результаты численного моделирования позволят снизить неопределённость оценок загрязнения местности радиоактивными аэрозолями и повысить их достоверность в интересах анализа и обеспечения безопасности населения, включая воздействие на окружающую среду радиоактивных аэрозолей, образующихся на объектах использования атомной энергии, которые эксплуатируются и будут использоваться в арктических районах Крайнего Севера.

Ключевые слова: радиоактивные аэрозоли, моделирование сухого осаждения, загрязнение поверхности земли.

Для цитирования: Припачкин Д.А., Садофьев И.Д. Результаты моделирования сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в условиях арктических районов Крайнего Севера. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):17–23. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-02>

For citation: Pripachkin D.A. Sadofev I.D. Simulation results of dry deposition of radioactive aerosols in the Arctic regions of the Far North. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):17–23. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-02>

Simulation results of dry deposition of radioactive aerosols in the Arctic regions of the Far North

Dmitriy A. Pripachkin  , Iia D. Sadofev

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

 DAPripachkin@mephi.ru

Abstract. Modeling of dry deposition of radioactive aerosols in the Arctic regions of the Far North is presented using a model of dry deposition of aerosols on heterogeneous underlying surfaces, which takes into account the influence of the size and density of aerosol particles, surface roughness characteristics and dynamic friction velocity, determined based on parameterization of the boundary and surface layers in the used version of the WRF-ARW model. Estimates of contamination of the earth's surface with radioactive aerosols with particle sizes of 0.1, 1 and 10 microns in the Arctic regions of the Far North (territories of Yamal Peninsula and Kola Peninsula) with heterogeneous underlying surfaces under real meteorological conditions in summer and winter periods have been obtained. It is shown that contamination of the earth's surface with radioactive aerosols in the Yamal and Kola Peninsulas depends on the size of aerosol particles

and the types of the underlying surface in summer and winter. The greatest heterogeneity of contamination of the territory and its dependence on the type of underlying surface is observed for particles less than 1 micron, and for large particles, the determining factors are the terrain and meteorological conditions at the time of release. The results of numerical modeling will reduce the uncertainty of estimates of contamination of the area with radioactive aerosols and increase their reliability in the interests of analyzing and ensuring public safety, including the environmental impact of radioactive aerosols generated at nuclear energy facilities that are operated and will be used in the Arctic regions of the Far North.

Keywords: radioactive aerosols, dry deposition modeling, earth surface pollution.

Введение

Загрязнение поверхности земли аэрозольными частицами, содержащими радиоактивные вещества, поступившими в атмосферу вследствие техногенных аварий и катастроф, является наиболее значимым фактором, определяющим их последствия для окружающей среды и человека. Основным механизмом загрязнения поверхности земли является сухое осаждение [1].

В большинстве существующих моделей переноса для прогнозирования загрязнения поверхности земли радиоактивными аэрозолями [2–5] и при решении некоторых практических задач [6], используют подход, основанный на «средних» параметрах аэрозольных частиц (размер – d_p , плотность – ρ_p) и фиксированных условиях осаждения (шероховатость поверхности – z_0 , скорость сухого осаждения – V_d), что приводит к ряду неопределенностей при оценке интенсивности их выпадений в реальных условиях.

Модель сухого осаждения радиоактивных аэрозолей на неоднородные поверхности, предложенная в [7], которая учитывает влияние размеров d_p и плотности ρ_p частиц, характеристик шероховатости поверхности z_0 и динамической скорости трения u^* , определяемой на основе параметризации пограничного и приземного слоя в использованной версии модели WRF-ARW [8], на величину скорости сухого осаждения V_d в более широком диапазоне ее изменений. Модель [7] отражает современные научные тенденции в моделировании сухого осаждения [1], но за счет учета большего количества факторов и локальных особенностей осаждения, и поз-

воляет оценить загрязнение поверхности земли радиоактивными аэрозолями более детально, по сравнению с другими подходами.

Целью настоящих исследований является оценка влияния неоднородности подстилающих поверхностей, на основе модели сухого осаждения [7], на загрязнение поверхности земли радиоактивными аэрозолями в летний и зимний периоды в арктических районах Крайнего Севера, связанных с интенсивным освоением региона и развитием Северного Морского Пути (СМП).

Результаты моделирования, полученные на основе модели [7] и программного средства ПАРРАД [9] были использованы для исследования и оценки сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в арктические районы, включающих Кольский полуостров и полуостров Ямал в летний и зимний периоды.

Исходные данные для моделирования

В процессе численных исследований влияния неоднородностей подстилающих поверхностей на сухое осаждение аэрозолей рассматривались арктические районы, включающие Кольский полуостров (Мурманская область) и полуостров Ямал (Ямало-Ненецкий автономный округ). Источники гипотетического выброса радиоактивных аэрозолей располагались в районах г. Мурманск и п. Сабетта. При моделировании учитывалось влияние подстилающей поверхности в летний и зимний периоды (рис. 1, табл. 1).

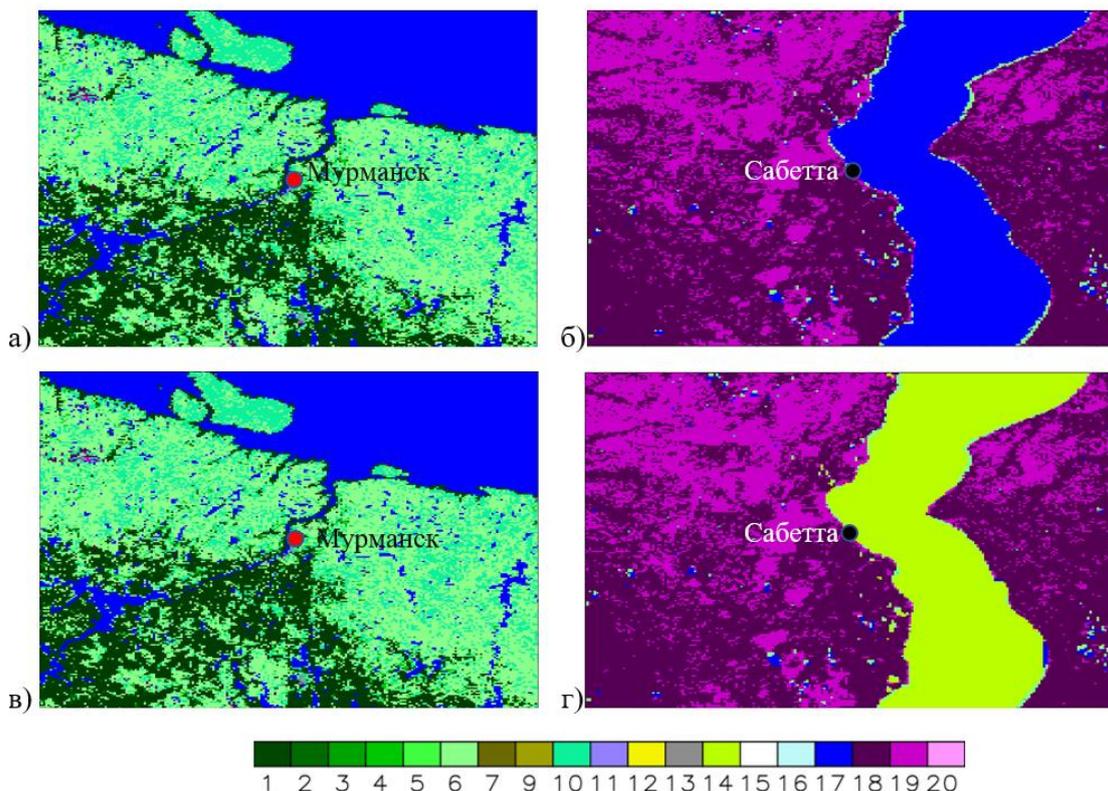


Рисунок 1. Типы подстилающей поверхности на Кольском полуострове (а – лето, в – зима) и полуострове Ямал (б – лето, г – зима) в соответствии со шкалой в таблице 1

Figure 1. Types of the underlying surface on the Kola Peninsula (а – summer, в – winter) and the Yamal Peninsula (б – summer, г – winter) according to the scale in Table 1

Таблица 1. Характеристики типов подстилающей поверхности по данным [8]

Table 1. Characteristics of surface land use types according to data [8]

№	Тип подстилающей Поверхности	Альbedo, (%)		Доля влаги, (%)		Шероховатость, z_0 (см)	
		Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима
1	Вечнозелёные леса (хвойные)	12	12	30	60	50	50
2	Вечнозелёные леса (лиственные)	12	12	50	50	50	50
3	Листопадные леса (хвойные)	14	14	30	60	50	50
4	Листопадные леса (лиственные)	16	16	30	60	50	50
5	Смешанные леса	13	13	30	60	50	50
6	Плотные кустарники	22	22	10	20	10	10
7	Редкие кустарники	20	20	15	25	10	10
8	Лесистые саванны	20	20	10	20	15	15
9	Саванна	20	20	15	15	15	15
10	Луга (пастбища)	19	19	15	30	7.5	7.5
11	Постоянные болота	14	14	42	72.5	30	30
12	Пашни	18	18	30	60	7.5	7.5
13	Город, застроенные территории	18	18	10	10	50	50
14	Пашни вперемежку с естественной растительностью	16	16	25	40	6.5	6.5
15	Снег и лёд	55	55	95	95	1	1
16	Редкая растительность на оголённой почве	25	25	2	5	6.5	6.5
17	Вода	8	8	100	100	0.01	0.01
18	Лесотундра	15	15	50	60	15	15
19	Смешанная тундра	15	15	50	60	10	10
20	Тундровая полупустыня (гренландского типа)	15	15	2	5	6	6

Для оценки осаждения на неоднородные поверхности рассматривали монодисперсные радиоактивные аэрозоли с $d_p = 0.1; 1$ и 10 мкм и $\rho_p = 2.5$ г/см³. Источник выброса, содержал ¹³⁷Cs и характеризовался как мгновенный и точечный на высоте 100 метров. Оценки загрязнения поверхности земли радиоактивными аэрозолями на территории Кольского полуострова и полуострова Ямал в реальных погодных условиях получены с использованием метеорологических полей из прогнозов по модели WRF-ARW [8] для летнего и зимнего периодов с учетом неоднородности и разнонаправленности поля ветра.

Результаты моделирования

Рассмотрим загрязнение поверхности земли радиоактивными аэрозолями ¹³⁷Cs, полученные с помощью ПАРРАД [9], на основе модели осаждения аэрозолей [7], учитывающей неоднородности подстилающей поверхности, динамической скорости трения, плотности и размера аэрозольных частиц, на Кольском полуострове и полуострове Ямал до 60 км от источника для реальных погодных условий в летний и зимний периоды с учетом высокой изменчивости направлений ветров и их скоростей.

На рисунках 2 и 3 представлены оценки загрязнения территории Кольского полуострова (летний – август 2020 г. и зимний – январь 2021 г.) и полуострова Ямал (летний – июль 2022 г. и зимний – февраль 2022 г.) за счет сухого осаждения аэрозолей с диаметром 0.1, 1 и 10 мкм и плотностью частиц 2.5 г/см³. Метеорологические данные получены с помощью прогнозов модели WRF-ARW [8]: длительность 24 часа, шаг по времени 1 час; разрешение по горизонтали – 2x2 км, по вертикали – 24 уровня с переменным шагом от 0 до 20000 м, условный выброс – 1 Бк на высоту 100 м.

При моделировании переноса и осаждения радиоактивных аэрозолей на территории Кольского полуострова использовали следующие метеорологические условия: лето – направление ветра изменялось в течение суток в пределах от южного до юго-западного, что формировало преимущественно устойчивый северо-восточный перенос (рис. 2а, 2б, 2в) в условиях отсутствия осадков; зима – направление ветра изменялось сильнее, чем для летнего периода в пределах от южного до северо-западного, что формировало перенос в северном, восточном и даже юго-восточном направлении (рис. 2г, 2д, 2е) также в условиях отсутствия осадков.

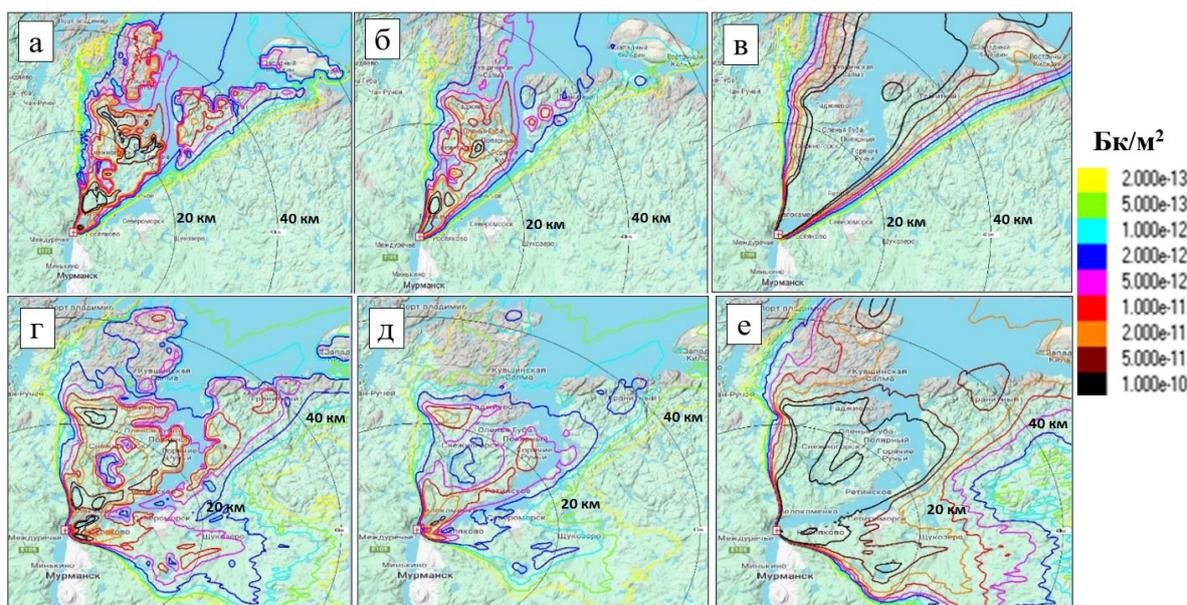


Рисунок 2. Плотность загрязнения территории Кольского полуострова для летнего ($d_p = 0.1$ мкм (а), 1 мкм (б) и 10 мкм (в)) и зимнего ($d_p = 0.1$ мкм (г), 1 мкм (д) и 10 мкм (е)) периодов года

Figure 2. Pollution density of the Kola Peninsula for the summer ($d_p = 0.1$ microns (a), 1 microns (b) and 10 microns (v)) and winter ($d_p = 0.1$ microns (г), 1 microns (д) and 10 microns (е)) periods of the year

Из рисунка 2 следует, что загрязнение радиоактивными аэрозолями территории Кольского полуострова (см. рис. 1) как в летний, так и зимний периоды обусловлено влиянием размеров частиц, неоднородностью подстилающей поверхности и реальной метеорологической обстановкой.

Для частиц с $d_p = 0.1$ мкм наблюдается наибольшая степень неоднородности загрязнения поверхности земли как для летнего (рис. 2а), так и зимнего (рис. 2з) периодов, что связано с разницей в скорости их сухого осаждения для поверхностей – кустарники, лес, вода (для лета – 1:2:0.1, а, для зимы 1:1:0.1 (Кольский залив и Баренцево море не замерзают)). Для частиц с $d_p = 0.1$ мкм картина загрязнения в большей степени определяется неоднородностью подстилающей поверхности, чем рельефом и метеоусловиями (направлением и скоростью ветра, динамической скоростью трения).

Для частиц с $d_p = 1$ мкм (рис. 2б и 2д) наблюдается уменьшение неоднородности загрязнения поверхности, по сравнению с частицами 0.1 мкм, это связано с разницей в скорости их сухого осаждения для поверхностей – кустарники, лес, вода (для лета – 1:5:0.5, а, для зимы 1:1:0.5).

Для частиц с $d_p = 1$ мкм картина загрязнения в большей степени определяется сочета-

нием неоднородности подстилающей поверхности и рельефа, влияющего на поле концентрации, чем метеоусловиями.

Для частиц с $d_p = 10$ мкм наблюдается отсутствие неоднородности загрязнения поверхности (рис. 2в, 2е), т. к. это связано с существенным ростом скорости их сухого осаждения по сравнению с частицами 0.1 и 1 мкм и с уменьшением разницы в скорости осаждения частиц с $d_p = 10$ мкм для поверхностей – кустарники, лес, вода (для лета – 1:10:1, а, для зимы – 1:1:1). Для частиц с $d_p = 10$ мкм загрязнение в большей степени определяется метеоусловиями, чем неоднородностью поверхности и рельефом местности.

Метеорологические условия для оценки загрязнения в реально наблюдаемых погодных условиях для полуострова Ямал были следующие: лето – направление ветра изменялось резко в течение суток с восточного на западное, что формировало перенос как в западном, так и в восточном направлении (рис. 3а, 3б, 3в) в условиях отсутствия осадков; зима – направление ветра изменялось в течение суток в пределах от западного до северо-западного, что формировало устойчивый юго-восточный перенос (рис. 3г, 3д, 3е) также в условиях отсутствия осадков.

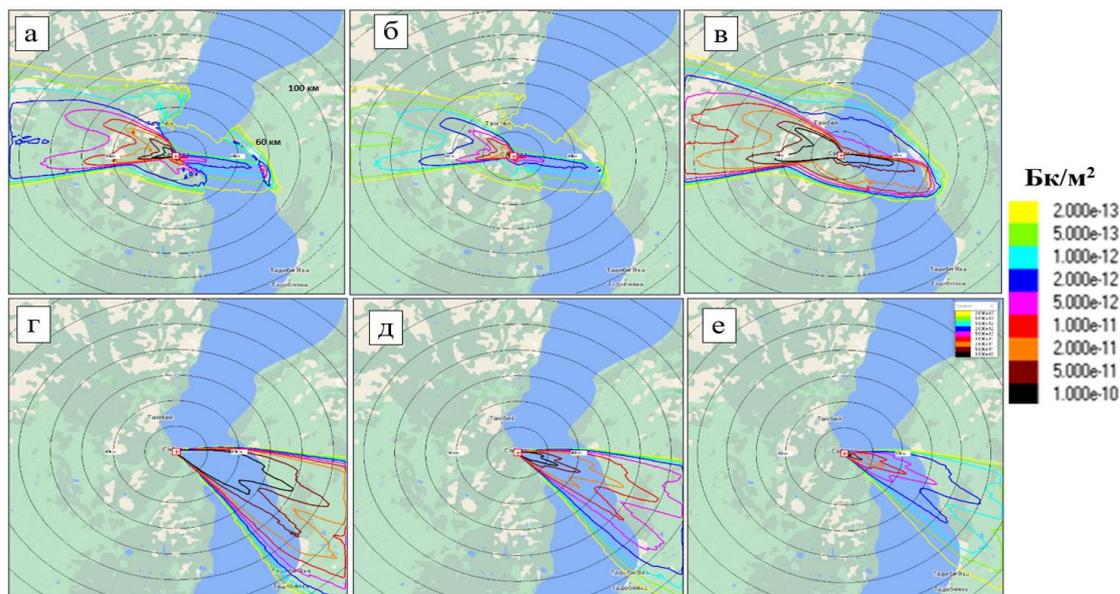


Рисунок 3. Плотность загрязнения территории полуострова Ямал для летнего ($d_p = 0.1$ мкм (а), 1 мкм (б) и 10 мкм (в)) и зимнего ($d_p = 0.1$ мкм (з), 1 мкм (д) и 10 мкм (е)) периодов года
Figure 3. Pollution density of the Yamal Peninsula for the summer ($d_p = 0.1$ microns (а), 1 microns (б) and 10 microns (в)) and winter ($d_p = 0.1$ microns (з), 1 microns (д) and 10 microns (е)) periods of the year

Из рисунка 3 следует, что загрязнение радиоактивными аэрозолями территории полуострова Ямал в арктической зоне обусловлено влиянием размеров аэрозолей, реальной метеорологической обстановкой и в незначительной степени неоднородностью подстилающей поверхности, характеризующейся следующими типами: тундра и вода (рис.1, табл. 1) для летнего периода; заснеженной тундрой в зимний период (*водные поверхности замерзают и рассматриваются как тундра*).

Для частиц с $d_p = 0.1$ мкм (рис. 3а и 3г) наблюдается наибольшая степень неоднородности загрязнения поверхности земли только в летнем периоде, что связано с разницей в скорости сухого осаждения аэрозолей на поверхность – тундра, вода (лето – 1:0.1), а для зимнего периода, скорости сухого осаждения одинаковы для тундры и воды (1:1). Применительно к частицам с $d_p = 0.1$ мкм картина загрязнения территории полуострова Ямал определяется неоднородностью подстилающей поверхности только в летний период, а в зимний – в основном метеорологическими условиями (направлением и скоростью ветра, динамической скоростью трения).

Для частиц с $d_p = 1$ мкм (рис. 3б и 3д) наблюдается уменьшение степени неоднородности загрязнения поверхности, это связано с уменьшением разницы в скоростях сухого осаждения аэрозолей по сравнению с частицами 0.1 мкм (рис. 3а). В летний период разница в скоростях сухого осаждения для частиц 1 мкм для поверхностей тундра и вода – (1:0.5), а для зимнего периода – (1:1). Загрязнение частицами с $d_p = 1$ мкм территории полуострова Ямал в большей степени зависит от метеорологических условий, чем от неоднородности подстилающей поверхности.

Моделирование показал, что для частиц с $d_p = 10$ мкм (рис. 3в и 3е) неоднородность

загрязнения поверхности за счет неоднородности подстилающей поверхности минимальна. Это связано как с существенным ростом скорости их сухого осаждения по сравнению с частицами 0.1 и 1 мкм, так и с равенством скоростей осаждения частиц с $d_p = 10$ мкм для поверхностей – тундра, вода (лето и зима – 1:1), поэтому картина загрязнения п-ва Ямал частицами с $d_p = 10$ мкм в основном определяется только метеорологическими условиями.

Заключение

На основе численного моделирования с помощью ПАРРАД [9] и модели сухого осаждения [7] показано, что загрязнение радиоактивными аэрозолями поверхности земли на территории п-ова Ямал и Кольского п-ова зависит от размеров аэрозольных частиц и типов подстилающей поверхности в летний и зимний периоды. Наибольшая неоднородность загрязнения территории и ее зависимость от типа подстилающей поверхности наблюдается для частиц менее 1 мкм, а для частиц больших размеров определяющими факторами являются рельеф местности и метеорологические условия во время выброса.

Используемая в настоящем исследовании модель сухого осаждения аэрозолей [7], за счет увеличения количества исходных данных и микрофизического описания сухого осаждения, хотя и требует дополнительного экспериментального подтверждения, позволит снизить неопределённость получаемых оценок и повысить их достоверность в интересах анализа и обеспечения безопасности населения, включая воздействие на окружающую среду радиоактивных аэрозолей, образующихся на объектах использования атомной энергии, которые эксплуатируются и будут использоваться в арктических районах Крайнего Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Wiley. 2016. 152 p. <https://www.wiley.com/en-us/Atmospheric+Chemistry+and+Physics%3A+From+Air+Pollution+to+Climate+Change%2C+3rd+Edition-p-9781118947401>.
2. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 256 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001609468?ysclid=m7xi6gmxfp339437018> (дата обращения: 09.01.2025).

3. AERMOD: description of model formulation. EPA-454/R-03-004. 2004. Available at: https://elsmar.com/pdf_files/EPA%20aermod_mfd.pdf (accessed: 10.01.2025).

4. Korsakissok I., Mathieu A., Didier D. Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A local-scale simulation and sensitivity study. *Atmospheric Environment* 70 (2013), 267-279. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.002>

5. Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Москва: «НТЦ ЯРБ», 2017. 40 с. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/555856678?section=status> (дата обращения: 09.01.2025).

6. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Заражение местности вследствие сухого оседания и вымывания осадками продуктов выброса из точечного источника. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;(1):14–22. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-02>

Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Area contamination due to dry settling and point source stack effluents wash-out by precipitates. *Global nuclear safety*. 2023;(1):14–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-02>

7. Припачкин Д.А., Высоцкий В.Л., Будыка А.К. Влияние условий моделирования на оценку скорости сухого осаждения аэрозольных частиц на сильно неоднородные подстилающие поверхности. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2024;60(2):173–182. <https://doi.org/10.31857/S0002351524020048>

Pripachkin D.A., Vysotsky V.L., Budyka A.K. Influence of modeling conditions on the estimation of the dry deposition velocity of aerosols on highly inhomogeneous surfaces. *Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. 2024;60(2):173–182. (In Rus). <https://doi.org/10.31857/S0002351524020048>

8. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. 2008. 520 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2310.6645>

9. Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Сороковикова О.С., Семенов В.Н. и др. Система ПАРРАД и ее испытания на реальных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. *Атомная энергия*. 2016;121(3):169–173. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/448/440> (дата обращения: 10.01.2025).

Arutyunyan R.V., Pripachkin D.A., Sorokovikova O.S., Semenov V.N. et al. PARRAD system and its testing on real radioactive emissions into the atmosphere. *Atomic energy*. 2017;121(3):220–226. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/xnegnl> (accessed: 10.01.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Припачкин Д.А. – разработка подходов к моделированию и анализ результатов;

Садофьев И.Д. – подготовка исходных данных и моделирование осаждения радиоактивных аэрозолей.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Pripachkin D. A. – development of modeling approaches and analysis of results;

Sadofev I.D. – preparation of initial data and modeling of radioactive aerosol deposition.

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 АВТОРЕ:

Дмитрий Александрович Припачкин, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-3412-6475>

e-mail: DAPripachkin@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Dmitriy A. Pripachkin, Dr. Sci. (Phys. and Math), head of department National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-3412-6475>

e-mail: DAPripachkin@mephi.ru

Илья Дмитриевич Садофьев, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», инженер, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: IDSadofev@mephi.ru

Ilya D. Sadofev, engineer, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: IDSadofev@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 09.01.2025

После доработки / Revision 10.03.2025

Принята к публикации / Accepted 13.03.2025

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-2025-01-03>

EDN MHSMZ

Оригинальная статья / Original paper



Исследования радиационно-защитных свойств природных
минералов Вьетнама

О.Л. Ташлыков¹  , Д.О. Пыльцова¹, Е.В. Кувшинова¹, Т.В. Тхьонг¹ ,
К.А. Махмуд^{1,2} 

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

² Управление ядерных материалов, Эль Маади, Каир, Египет

 o.l.tashlykov@urfu.ru

Аннотация. Затраты на обеспечение защиты современных ядерно-технических установок составляют значительную долю (20-30%) от общей стоимости строительства. Поэтому оптимизация состава радиационно-защитных материалов является важным направлением для минимизации расходов на защиту при сохранении высоких показателей её эффективности. Значительный вклад в снижение затрат на строительство объектов атомной энергетики (ОИАЭ) вносят природные ресурсы, месторождения которых расположены вблизи этих объектов. В современных радиационных технологиях композитные радиационно-защитные материалы (РЗМ) с матрицей из стекла, полимеров, цемента и других материалов играют ключевую роль. Включение различных наполнителей в состав матрицы позволяет проектировать оптимальный состав РЗМ для конкретных условий облучения, определяемых изотопным составом радиоактивных загрязнений. В качестве наполнителей могут быть использованы как природные материалы, так и отходы промышленного производства, что способствует решению проблемы их утилизации. В данной статье представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований образцов природных минералов из северной части Вьетнама. Данное исследование является частью комплексного проекта, который реализуется на кафедре «Атомные станции и ВИЭ» Уральского федерального университета (УрФУ) уже более 10 лет. Проект направлен на изучение радиационно-защитных свойств природных минералов и промышленных отходов с целью оценки их потенциальной применимости в составе строительных материалов для защиты ОИАЭ. Для исследования расчета радиационно-защитных свойств минералов плотность образцов определялась методом Архимеда с помощью плотномера МН-300А, химический состав – с помощью рентгенофлуоресцентного анализа в лаборатории Управления по ядерным материалам Египта (г. Каир), использовалась база данных ХСОМ. Экспериментальное исследование экранирующих свойств образцов проводилось с помощью спектрометрической установки «Роботрон». Результаты исследования природных материалов выявили образцы камней, которые могут быть использованы в качестве наполнителя бетона при строительстве АЭС и других объектов атомной энергетики во Вьетнаме, а также глины для изготовления радиационно-защитных блоков для быстровозводимой защиты.

Ключевые слова: защита от гамма-излучения, массовый коэффициент ослабления, линейный коэффициент ослабления, база данных ХСОМ, минералы, атомная энергетика, Вьетнам, радиационно-защитные материалы, АЭС.

Для цитирования: Ташлыков О.Л., Пыльцова Д.О., Кувшинова Е.В., Тхьонг Т.В., Махмуд К.А. Исследования радиационно-защитных свойств природных минералов Вьетнама. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):24–32. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-03>

For citation: Tashlykov O.L., Pyltsova D.O., Kuvshinova E.V., Thuong Ta Van, Mahmud K.A. Studies of radiation and protective properties of natural minerals in Vietnam. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):24–32. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-03>

Studies of radiation and protective properties of natural minerals in Vietnam

Oleg L. Tashlykov¹  , Daria O. Pyltsova¹, Elena V. Kuvshinova¹, Ta Van Thuong¹ ,
Karim A. Mahmud^{1,2} 

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russian Federation

² Nuclear Materials Authority, El Maadi, Cairo, Egypt
 o.l.tashlykov@urfu.ru

Abstract. The costs of ensuring the protection of modern nuclear engineering installations account for a significant proportion (20-30%) of the total cost of construction. Therefore, optimization of the composition of radiation protection materials is an important direction for minimizing protection costs while maintaining high performance indicators. Natural resources, the deposits of which are located near these facilities, make a significant contribution to reducing the cost of construction of nuclear power facilities. In modern radiation technologies, composite radiation protective materials (REM) with a matrix of glass, polymers, cement and other materials play a key role. The inclusion of various fillers in the matrix makes it possible to design the optimal composition of REM for specific irradiation conditions determined by the isotopic composition of radioactive contamination. Both natural materials and industrial waste can be used as fillers, which helps to solve the problem of their disposal. This article presents the results of computational and experimental studies of samples of natural minerals from the northern part of Vietnam. This research is part of a comprehensive project that has been implemented at the Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy of the Ural Federal University (UrFU) for more than 10 years. The project is aimed at studying the radiation-protective properties of natural minerals and industrial waste in order to assess their potential applicability as part of building materials for the protection of nuclear power plants. To study the calculation of the radiation-protective properties of minerals, the sample density was determined by the Archimedes method using the MH-300A density meter, the chemical composition was determined using X-ray fluorescence analysis in the laboratory of the Egyptian Nuclear Materials Administration (Cairo), the XCOM database was used. Experimental investigation of the shielding properties of the samples was carried out using the Robotron spectrometric installation. The results of the study of natural materials revealed samples of stones that can be used as a concrete filler in the construction of nuclear power plants and other nuclear power facilities in Vietnam, as well as clay for the manufacture of radiation protection blocks for prefabricated protection.

Keywords: gamma radiation protection, XCOM database, mass attenuation coefficient, linear attenuation coefficient, minerals, nuclear energy, Vietnam, radiation protection materials, nuclear power plants.

Введение

В рамках обеспечения безопасности атомной энергетики радиационная защита должна поддерживать уровни излучения, безопасные для персонала, работающего в зонах контролируемого доступа АЭС^{1,2}. Согласно действующим стандартам, радиационная защита может быть стационарной (используемой как несущая конструкция зданий объекта использования атомной энергии), постоянной (выполняющей роль экранирования без дополнительной нагрузки) или временной (создаваемой на период

проведения радиационно-опасных работ, таких как ремонт и вывод из эксплуатации АЭС).

Для создания стационарных конструкций, обеспечивающих радиационную защиту, часто используют бетон, который не только обладает высокой прочностью, но и служит основой защитных оболочек ядерных реакторов. В некоторых случаях применяются кирпичные элементы, что позволяет строить защитные конструкции с возможностью быстрого монтажа. Защитные кирпичи особенно эффективны при возведении быстровозводимой биологической защиты [1,2], создаваемой вручную без использования специализированной строительной техники, что важно при ограниченных пространствах на объекте.

Глина, как материал для изготовления кирпичей, предоставляет дополнительные преимущества при сооружении таких конструкций, в том числе для обеспечения за-

¹ Егоров Ю.А. Основы радиационной безопасности атомных электростанций. – Москва: Энергоатомиздат, 1982. 271 с. – Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001074342/?ysclid=m70j0m6i2j43206245 (дата обращения: 21.11.2024).

² Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. – Москва: Энергоатомиздат, 1995. – 494 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01001740227?ysclid=m6z9na01ho523424491>

щиты во время проведения работ по ремонту оборудования или установке дополнительной защиты для контейнеров с радиоактивными отходами. В радиационных полях на объектах атомной энергетики часто используется экранирование источников ионизирующего излучения с соблюдением принципа оптимизации воздействия радиации на окружающих³ [3,4,5].

Современные технологии радиационной защиты включают использование композитных материалов, таких как стекло, полимеры, цемент и другие компоненты, которые играют ключевую роль в защите от различных видов излучений⁴ [6]. Подбор состава и концентрации наполнителей, включаемых в состав матрицы, позволяет подбирать оптимальный состав РЗМ, обеспечивающий их максимальную эффективность для планируемых условий облучения, которые зависят от радиоизотопного состава загрязнений в объеме и на поверхности оборудования и помещений [7].

В России атомная отрасль продолжает активно развиваться, а Госкорпорация «Росатом» занимает ведущие позиции на мировом рынке строительства атомных электростанций. В настоящее время в различных стадиях реализации находятся 26 энергоблоков, а также другие объекты атомной энергетики. В этом контексте особое внимание уделяется исследованию местных природных минералов для их потенциального применения в радиационной защите, что позволяет снижать капитальные затраты, а также разрабатывать новые бессвинцовые композитные материалы для защиты от ионизирующего излучения, особенно гамма-излучения.

Сотрудничество с зарубежными учеными, включая аспирантов из Египта, Иордании, Вьетнама, Саудовской Аравии и Турции,

способствует обмену опытом и расширяет горизонты исследований в области радиационной защиты. Эти усилия активно поддерживаются студентами кафедры «Атомные станции и ВИЭ» УрФУ, создающими научные коллективы для решения глобальных проблем отрасли.

В данной работе представлен обзор результатов расчетно-экспериментальных исследований, проведенных научной группой, изучающей радиационно-защитные свойства природных материалов Вьетнама. Несмотря на остановку в ноябре 2016 г. реализации проекта АЭС «Ниньтхуан» во Вьетнаме, вопрос о сооружении атомной станции окончательно не закрыт, возможен возврат к рассмотрению вопроса о строительстве АЭС [8]. Площадка, выбранная под строительство АЭС «Ниньтхуан», сохранена.

Сейчас во Вьетнаме при помощи Росатома приступили к подготовке к реализации проекта по сооружению Центра ядерной науки и техники атомного научно-исследовательского центра с исследовательским водо-водяным реактором мощностью до 15 МВт [9].

Материалы и методы

Образцы минералов и глины были собраны в северных регионах Вьетнама (провинции Лаокай, Тханьхоа, Лайчау) и доставлены в лабораторию кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского федерального университета для исследований. Для проведения исследований образцы минералов были разрезаны до необходимых размеров и отшлифованы с целью получения параллельных граней для просвечивания гамма-излучением (рис. 1).

Для проведения исследований из красной и белой глины были изготовлены образцы радиационно-защитных материалов с глиняной матрицей. Для их изготовления собранные глины были смешаны с эпоксидной смолой, спрессованы при различных уровнях давления. Было экспериментально исследовано влияние давления на физические, структурные и защитные свойства образцов от γ -излучения (рис. 2).

³ МУ 2.6.5.054–2017. Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий Госкорпорации «Росатом». Методические указания. – Москва: Федеральное медико-биологическое агентство, 2017. – 52 с. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_309073/?ysclid=m70ke0payp983580121 (дата обращения: 21.11.2025)

⁴ Арбузов В.И. Основы радиационного оптического материаловедения. – Санкт-Петербург: СПбГУИТМО, 2008. – 284 с. – Режим доступа: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/361.pdf> (дата обращения: 21.11.2025).

Химические соединения	Химический состав (%)							
	G 7.2	G 9c	GS1	M 3	G 9a	RL 4	GG 8.2	G 9b
CdO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sb ₂ O ₅	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
WO ₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PbO	0.001	0.003	0.004	0.000	0.001	0.001	0.006	0.004
Bi ₂ O ₅	0.005	0.003	0.003	0.000	0.008	0.003	0.012	0.002
Лёгкие элементы	38.608	36.388	29.734	70.555	39.305	42.839	54.070	53.292

Таблица 2. Химический состав исследуемых образцов из глины

Table 2. Chemical composition of the studied clay samples

Химический элемент	Химический состав (%)	
	Красная	Белая
O	48,836	49,776
Na	0,272	1,422
Al	11,61455	11,422
Si	29,73	35,076
K	1,988	1,47
Fe	8,627	0,832

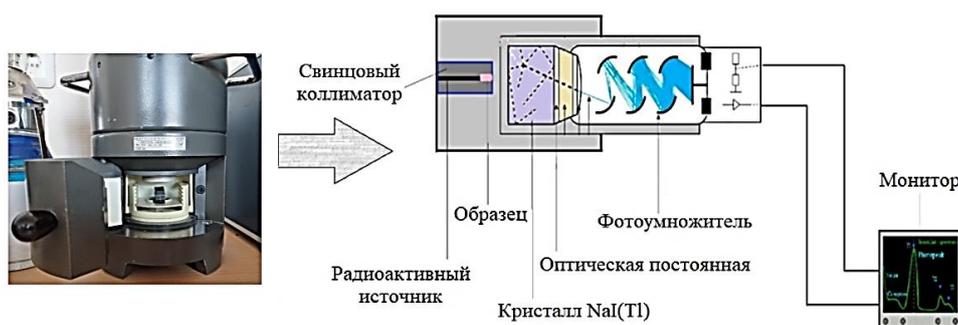


Рисунок 3. Схема устройства спектрометра

Figure 3. Diagram of the spectrometer device

Для этого проводились измерения интенсивностей счета импульсов I_0 (без поглотителя) и I_1 (с поглотителем толщиной l). Линейный коэффициент ослабления μ определяется по формуле (1):

$$\ln \frac{I_0}{I_1} = \mu \cdot l, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность счета импульсов без поглотителя;

I_1 – интенсивность счета импульсов с поглотителем толщиной l ;

μ – линейный коэффициент ослабления.

Важной величиной, обратной линейному коэффициенту ослабления μ , является слой половинного ослабления $\Delta_{0,5}$ (см), показывающий при какой толщине поглотителя интенсивность излучения уменьшается в два раза. Слой половинного ослабления определяется по формуле (2):

$$\Delta_{0,5} = \frac{\ln(2)}{\mu}. \quad (2)$$

В результате измерения счета импульсов был рассчитан массовый коэффициент ослабления образцов по формуле (3):

$$\mu_m = \frac{\ln \frac{I_0}{I_1}}{l \cdot \rho}, \quad (3)$$

где ρ – плотность образцов.

Для проведения измерения требовалась параллельность граней образцов, поэтому был произведен отбор, а также каждый образец подвергался нескольким измерениям для получения усредненных результатов. Просвечивание образцов производилось гамма-излучением с использованием источников излучения Cs-137 и Co-60.

На основании результатов измерения и определения линейного коэффициента

ослабления и химанализа были определены значения массового коэффициента ослабления.

Используя правило смешивания, массовый коэффициент ослабления вычисляется следующим образом (4):

$$\mu_m = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i, \quad (4)$$

где $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i$ – коэффициент массового ослабления i -го элемента исследуемых образцов;

w_i – массовая доля для каждого элемента.

Программное обеспечение ХСОМ используется для теоретической оценки массового коэффициента ослабления [10]. Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) составил базу данных сечений фотонов, используемую в программе ХСОМ. ХСОМ предоставляет полное сечение, а также парциальное сечение следующих процессов: некогерентного рассеяния, когерентного рассеяния, фотоэлектрического поглощения и образования пар в полях атомного ядра и в поле электронов атомов.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерений линейного коэффициента ослабления для образцов камней представлены на рисунке 4. Из графика видно, что наибольшими экранирующими способностями обладают образцы GG 8.2 и G 9c.2.

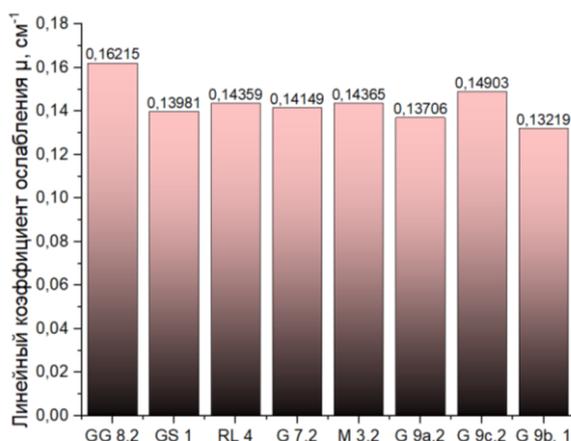


Рисунок 4. Линейный коэффициент ослабления образцов камней

Figure 4. Linear attenuation coefficient of stone samples

Значения массового коэффициента ослабления, определенные при помощи базы данных ХСОМ на основе химического состава, представлены на рисунке 5.

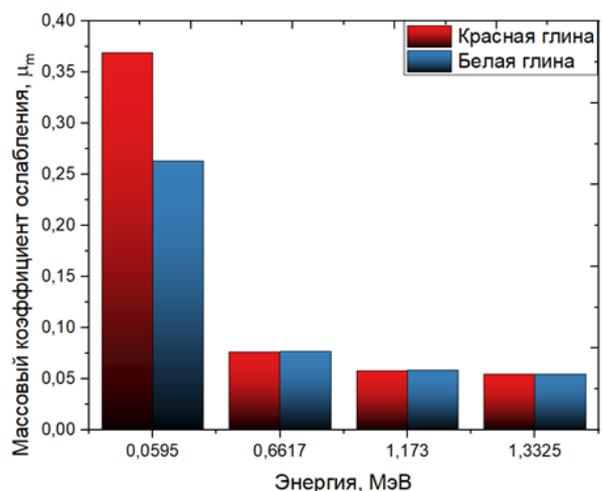
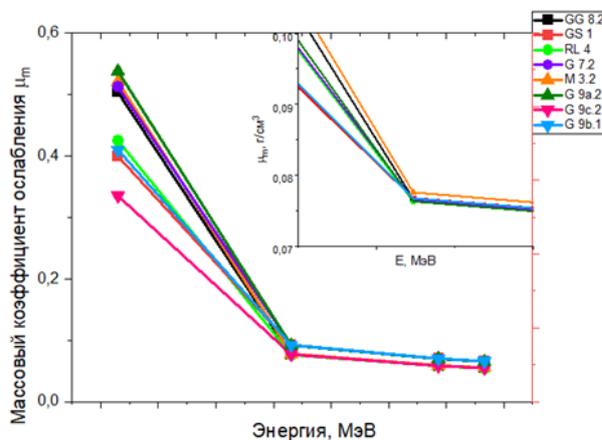


Рисунок 5. Зависимость массового коэффициента ослабления от энергии гамма-излучения для камней (а) и образцов из глины (б)

Figure 5. Dependence of the mass attenuation coefficient on energy for stones from Vietnam (a) the dependence of the mass attenuation coefficient on energy for clay samples (b)

На рисунке 6 представлено сравнение значений линейного коэффициента ослабления изготовленных образцов из глины с наполнителем в виде промышленных отходов с другими образцами радиационно-защитных материалов по данным, приведенным в зарубежных публикациях [11–13].

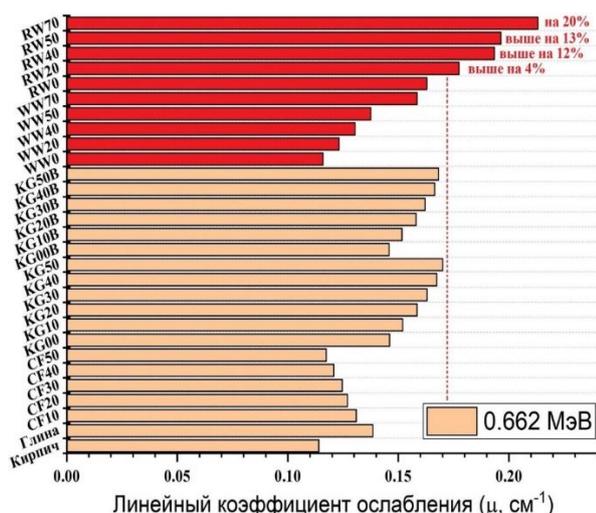


Рисунок 6. Сравнение линейного коэффициента ослабления образцов радиационно-защитного матрицей из глины

Figure 6. Comparison of clay samples with its analogues

Как показали результаты исследования, одним из способов улучшения экранирующих свойств образцов радиационно-защитных материалов из красной и белой глины Вьетнама (серия PR) является использование при их изготовлении гидравлического пресса, создающего давление от 7,61 до 114,22 МПа. Использование прессования позволило повысить плотность образцов, что привело к увеличению линейного коэффициента ослабления образцов на основе красной глины на 32% и 36%, а для образцов из белой глины на 14% и 17% при энергиях гамма-излучения 0,66 и 1,33 МэВ, соответственно. При этом толщина слоя половинного ослабления, обратно пропорциональная коэффициенту линейного ослабления, для образцов из красной глины уменьшилась на 24% и 27%, а для образцов из белой глины на 12% и 15% при энергиях гамма-излучения 0,66 и 1,33 МэВ.

Результаты исследования улучшения экранирующих от γ -излучения свойств композитных образцов радиационно-защитных материалов, созданных на основе матрицы из красной и белой глины Вьетнама (серии RW и WW), при добавлении промышленных металлических отходов в образцах от 0 до 70%, продемонстрировали возрастание линейного коэффициента ослабления образцов,

изготовленных на основе красной глины на 24% и 16%, а для композитов на основе белой глины – на 27% и 21% при энергиях гамма-излучения 0,66 и 1,33 МэВ соответственно. Уменьшение толщины слоя половинного ослабления композитов на основе красной глины составило 24% и 17%, для композитов на основе белой глины – 27% и 20% при тех же значениях энергии гамма-излучения (0,66 и 1,33 МэВ).

Среди исследованных образцов камней из месторождений Вьетнама наибольшее значение линейного и массового коэффициентов ослабления, а соответственно, наименьшую толщину слоя половинного ослабления имеют образцы GG 8.2 (зеленый гранит) и M3 (мрамор), что говорит о значительном потенциале их использования в качестве природных экранирующих материалов, а также в качестве наполнителя для бетона при сооружении ОИАЭ во Вьетнаме.

Заключение

В ходе исследований были отобраны наиболее эффективные образцы природных камней Вьетнама, обладающие высокой степенью радиационной защиты. Эти материалы могут быть использованы в составе строительных конструкций для обеспечения радиационной безопасности на объектах, связанных с атомной энергетикой. Применение местных природных минералов, обладающих хорошими экранирующими свойствами, значительно снижает затраты на строительство объектов использования атомной энергии. Доступность и распространённость этих материалов на территории Вьетнама делают их наилучшим выбором для реализации проектов сооружения объектов использования атомной энергии на территории Вьетнама.

Радиационно-защитные свойства композитных материалов с матрицей из красной глины имеют лучшие экранирующие свойства по сравнению с зарубежными аналогами и могут быть использованы для изготовления радиационно-защитных блоков для быстровозводимой защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Van Thuong T., Tashlykov O.L., Mahmoud K.A. A unique Vietnam's red clay-based brick reinforced with metallic wastes for γ -ray shielding purposes: Fabrication, characterization, and γ -ray attenuation properties. *Nuclear engineering and technology*. 2024;56(4):1544–1551. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.003>
2. Van Thuong T., Tashlykov O.L., Mahmoud K.A. Lightweight bricks based Vietnamese red clay for radiation protection: A deep look for the impacts of compressive strength on the characterization, and gamma ray shielding evaluation. *Radiation physics and chemistry*. 2024;218:111583. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111583>
3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Булатов В.И., Шастин А.Г. О проблеме снижения дозовых затрат персонала АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2011;1:55–60. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/01.pdf> (дата обращения: 18.11.2024).
Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Bulatov V.I., Shastin A.G. Problem of the Lowering of the Nuclear Power Plant Personnel Exposure. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011;1:55–60. (In Russ.). Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2011/01.pdf> (accessed: 18.11.2024).
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органо-металлических композиций. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015;2:49–55. Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf (дата обращения: 20.11.2024).
Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Chomjakov A.P., Russkikh I.M., Seleznev E.N. Experimental research protection against gamma radiation of organic and metallic compositions. *Global nuclear safety*. 2015;2:49–55. (In Russ.). Available at: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf (accessed: 20.11.2024).
5. Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Балушкин Ф.А. и др. Возможности математических методов моделирования в решении проблемы снижения облучаемости персонала. *Вопросы радиационной безопасности*. 2009;4:47–57. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_13017352_21996743.pdf (дата обращения: 18.11.2024).
Tashlykov O.L., Seseikin A.N., Shcheklein S.E., Balushkin F.A. et al. Possibilities of mathematical modeling methods in solving the problem of reducing personnel exposure. *Radiation safety issues*. 2009;4:47–57. (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_13017352_21996743.pdf (accessed: 18.11.2024).
6. Бормотов А.Н., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Данилов Ю.М., Соколова Ю.А. Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации: монография. Москва: Издательство «Палеолит», 2006. 272 с. Режим доступа: [Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации](#) (дата обращения: 18.11.2024).
Bormotov A.N., Proshin A.P., Bazhenov Yu.M., Danilov Yu.M., Sokolova Yu.A. Polymer composite materials for radiation protection: monograph. Moscow: Publishing house «Paleolit», 2006. 272 p. (In Russ.). Available at: [Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации](#) (accessed: 18.11.2024).
7. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В. Ю., Михайлова А.Ф. и др. Оптимизация состава радиационной защиты. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2015;4:36–42. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.4.04>
Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Lukyanenko V. Yu., Mikhailova A.F. et al. Optimization of radiation protection composition. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2015;4:36–42. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.4.04>
8. Тхьонг Та Ван, Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Фам Кхак Туен, Чан Бао Шон. Анализ состояния энергетической структуры и оценка условий для развития атомной энергетики во Вьетнаме. *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2023;2(407):43–53. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.02.043-053>
Thuong Ta Van, Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Pham Khak Tuen, Chan Bao Shon. An analysis of the state of the energy structure and assessment of conditions for the development of nuclear energy in Vietnam. *International scientific journal Alternative energy and ecology*. 2023;2(407):43–53. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2023.02.043-053>
9. Thuong Ta Van, Tashlykov O.L., Khac Tuyen P. Preparation of guidance on the appraisal of the environmental impact assessment report for the center for nuclear science and technology of Vietnam (2023) E3S Web of Conferences 389, 09057. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338909057>
10. Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., Olsen K. XCOM: Photon cross sections database. NIST Standard Reference Database 8 (XGAM). Physical Measurement Laboratory, 2010. <https://dx.doi.org/10.18434/T48G6X>
11. Isfahani H.S., Abtahi S.M., Roshanzamir M.A., Shirani A., Hejazi S.M. Investigation on gamma-ray shielding and permeability of clay-steel slag mixture. *Bulletin of engineering geology and the environment*. 2019;78:4589–4598. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1391-6>
12. Echeweozo E.O., Asiegbu A.D., Efurumibe E.L. Investigation of kaolin – Granite composite bricks for gamma radiation shielding. *International journal of advanced nuclear reactor design and technology*. 2021;3:194–199. <https://doi.org/10.1016/j.jandt.2021.09.007>
13. Share Isfahani H., Abtahi S.M., Roshanzamir M.A., Shirani A., Hejazi S.M. Permeability and Gamma-Ray shielding efficiency of clay modified by barite powder. *Geotechnical and geological engineering*. 2019;37:845–855. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0654-0>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Ташлыков О.Л. – руководство исследованием, разработка методологии исследования, редактирование;

Пыльцова Д.О. – написание первоначального варианта статьи;

Кувшинова Е.В. – подготовка иллюстраций;

Тхьонг Та Ван – подготовка и изготовление образцов, проведение экспериментов, обработка результатов;

Махмуд К.А. – проведение экспериментов, обработка результатов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

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

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

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

Дарья Олеговна Пыльцова, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: dpyltsova@list.ru

Елена Васильевна Кувшинова, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: kuvsinovae793@gmail.com

Та Ван Тхьонг, научный сотрудник, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-9086-670X>

e-mail: tavanthuong_tvt@yahoo.com.vn

Карем Абделазим Махмуд, научный сотрудник, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5795-4727>

e-mail: karemabdelazeem@yahoo.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Tashlykov O.L. – research management, development of research methodology, editing;

Pyltsova D. O. – writing an original draft;

Kuvshinova E.V. – production of illustrations;

Thuong Ta Van – preparation and manufacturing of samples, conducting experiments, processing results;

Mahmoud K.A. – conducting experiments, processing results.

FUNDING:

The study has no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

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

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

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

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

e-mail: dpyltsova@list.ru

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

e-mail: kuvsinovae793@gmail.com

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

<https://orcid.org/0000-0002-9086-670X>

e-mail: tavanthuong_tvt@yahoo.com.vn

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

<https://orcid.org/0000-0001-5795-4727>

e-mail: karemabdelazeem@yahoo.com

Поступила в редакцию / Received 21.11.2024

После доработки / Revision 21.02.2025

Принята к публикации / Accepted 27.02.2025

**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-2025-01-04>

EDN MNYPGH

Оригинальная статья / Original paper



**Опыт наладки системы автоматического регулирования турбины
К-1200-6,8/50**

**В.В. Филатов¹  , А.А. Беляков², А.А. Сорокин³, А.И. Бодров³,
А.В. Варзанов³, Н.С. Волков³**

¹ АО «Концерн Росэнергоатом», г. Москва, Российская Федерация

² Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, г. Иваново,
Российская Федерация

³ АО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

 Filatov-vv@rosenergoatom.ru

Аннотация. Строительство новых атомных электростанций по проекту АЭС-2006 потребовало от Ленинградского металлического завода (ЛМЗ) в проекте конденсационной турбины большой мощности К-1200-6,8/50 реализации электронной и гидравлической системы регулирования и защиты турбины (САРЗ) на основе опыта, конструктивных и схемных решений для аналогичной системы быстроходной турбины-аналога К-1000-60-3000 производства ЛМЗ. Несмотря на сохранение компоновки турбины по отношению к турбине-аналогу (2 ЦВД + ЦВД + 2 ЦНД), концепции управления турбиной посредством САРЗ и применения соответствующих конструктивных референтных решений ЛМЗ, в период пусконаладочных работ на энергоблоках Нововоронежской АЭС-2, как показал опыт, возникали случаи некорректной работы САРЗ по причине скрытых несоответствий отдельных элементов оборудования. Устранение причин некорректной работы гидравлических узлов зачастую непосредственно связано с поиском коренной причины «изнутри», т.е. требуется разборка оборудования. В представленной статье приведены случаи некорректной работы САРЗ и пути их решения из опыта пусконаладочных работ на турбине большой мощности К-1200-6,8/50 с кратким описанием проблемных гидравлических узлов САРЗ, объемов доработки конструктивных элементов. Приведенный в настоящей статье опыт пусконаладочных работ и по сей день является актуальным по причине проведения регулярных планово-предупредительных ремонтов на введенных в эксплуатацию энергоблоках проекта АЭС-2006, в процессе которых выполняется регламентная ревизия гидравлических элементов органов парораспределения, а также предпусковая проверка взаимодействия гидравлической (ГЧСР) и электронной (ЭЧСР) частей САРЗ. Кроме того, в настоящее время за рубежом выполняется ввод в эксплуатацию энергоблоков АЭС с турбиной К-1200-6,8/50 (Народная Республика Бангладеш), где описанный опыт по случаю может быть применен.

Ключевые слова: АЭС, система автоматического регулирования, пусконаладочные работы, блок регулирования, огнестойкая жидкость, ЭПП-С.

Для цитирования: Филатов В.В., Беляков А.А., Сорокин А.А., Бодров А.И., Варзанов А.В., Волков Н.С. Опыт наладки системы автоматического регулирования турбины К-1200-6,8/50. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):33–39. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04>

For citation: Filatov V.V., Belyakov A.A., Sorokin A.A., Bodrov A.I., Varzanov A.V., Volkov N.S. Setup experience in commissioning hydraulic control system of turbine K -1200-6,8/50. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):33–39. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-04>

Setup experience in commissioning hydraulic control system of turbine K -1200-6,8/50

Vyacheslav V. Filatov¹  , Andrey A. Belyakov², Aleksandr A. Sorokin³,
Aleksandr I. Bodrov³, Andrey V. Varzanov³, Nikita S. Volkov³

¹ Joint Stock Company «Rosenergoatom», Moscow, Russian Federation

² State Educational Institution of Higher Professional Education Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo, Russian Federation

³ Joint Stock Company «Power machines», St. Petersburg, Russian Federation

 Filatov-vv@rosenergoatom.ru

Annotation. The construction of new nuclear power plants under the NPP-2006 project required Leningradsky Metallichesky Zavod (LMZ) to implement an electronic and hydraulic turbine regulation and protection system (TRPS) in the design of a large capacity condensing turbine K-1200-6,8/50, based on the experience, design and circuit solutions for a similar system of a high-speed turbine-analogue K-1000-60-3000 manufactured by LMZ. Despite the preservation of the turbine layout in relation to the turbine-analogue (2LP module + HP module + 2LP module), the turbine control concept through the TRPS and the available references at the stage of commissioning of the Novovoronezh NPP-2 power units (before the power unit was turned on to the grid), as experience has shown, there were cases of incorrect operation of the TRPS due to the ambiguity of the assembly or hidden inconsistencies. The elimination of the causes of incorrect operation of hydraulic assemblies is often directly related to the search for the root cause "from the inside", i.e. disassembly of equipment is required. The presented article shows cases of incorrect operation of the TRPS and ways to solve them from the experience of commissioning on a high-capacity turbine K-1200-6,8/50 with a brief description of the problematic TRPS hydraulic components, the amount of refinement of structural elements. The experience of commissioning described in this article is still relevant today due to regular scheduled preventive repairs at commissioned power units of the NPP-2006 project, during which a routine audit of the hydraulic elements of the steam distribution organs is carried out, as well as a pre-start check of the interaction of the hydraulic and electronic parts of the TRPS. In addition, the commissioning of nuclear power plants with turbine K-1200-6,8/50 is currently underway abroad (in People's Republic of Bangladesh) where the described experience can be applied on occasion.

Keywords: NPP, automatic control system, commissioning, control unit, fire-resistant liquid, EHC-A.

Успешное проведение пусконаладочных работ на технологических системах турбоустановки на этапе ввода энергоблока АЭС в эксплуатацию требует тщательной подготовки и сопровождения монтажа трубопроводов и оборудования (в том числе на этапе ревизии или расконсервации) для выявления возможных скрытых несоответствий отдельных элементов оборудования. Повышенное внимание к производству монтажных работ, обеспечению технологии «чистого» монтажа, соблюдению требований заводской и пусконаладочной документации на пусковых энергоблоках АЭС уделяется системе автоматического регулирования и защиты паровой турбины большой мощности, являющейся системой, обеспечивающей поддержание параметров турбины в различных режимах работы (режима разворота, поддержание номинальной частоты вращения, режим нагружения/разгрузки с требуемой скоростью, динамические режимы работы энергоблока).

В проекте систем турбоустановок К-1200-6,8/50 [1] энергоблоков АЭС, введенных в промышленную эксплуатацию за последние 10 лет в Российской Федерации и за рубежом (Новovoroneжская АЭС-2, Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС), применена электрогидравлическая система регулирования и защиты производства Ленинградского металлургического завода (далее – ЛМЗ) (САРЗ) с применением в качестве рабочей среды огнестойкой жидкости. Объем модернизации САРЗ при сохранении конструктивной схемы 2 ЦНД + ЦВД + 2 ЦНД быстроходной турбины-прототипа меньшей мощности К-1000/60-3000 [2] следующий:

- применен электронный автомат безопасности наряду с механическим регулятором безопасности;
- функции управления, алгоритмы работы реализованы в микропроцессорном турбинном контроллере;
- сервомоторы регулирующих клапанов турбины оснащены блоками пружин (вместо

паровых сервомоторов) и индивидуальными электрогидравлическими преобразователями-сумматорами (ЭГП-С) [3];

– компоновка сливных коллекторов САРЗ по бортам турбины дополнена отдельным сливным коллектором ЭГП-С;

– понижена высота переливного порога всасывающих отсеков блока маслоснабжения.

Основными гидравлическими узлами в составе САРЗ являются: блок маслоснабжения, блок регулирования, ЭГП-С, сервомоторы органов парораспределения турбины (стопорные клапаны, регулирующие клапаны, сбросные клапаны, клапан греющего пара СПП). Следует отметить, что электрогидравлическая схема управления регулирующими клапанами турбины К-1200-6,8/50 реализована ЛМЗ с учетом обратной связи по управляющим давлениям [4].

Как показал опыт выполнения подготовительных и наладочных работ на вводимых в эксплуатацию энергоблоках Нововоронежской АЭС-2 из перечисленного выше перечня гидравлических узлов следует выделить несколько элементов, правильная настройка и работа которых непосредственно влияет на ход проведения наладочных работ и сроки завершения комплексного опробования САРЗ в целом. Таковыми являются блок регулирования и ЭГП-С. Именно эти элементы САРЗ потребовали большего времени на выявление причин отклонения в работе САРЗ на турбине с невращающимся ротором после проведения ревизии оборудования, предмонтажных очисток и сборки штатной схемы маслопроводов.

Вибрация трубок внутри блока регулирования

Блок регулирования САРЗ (рис. 1), расположенный на отливе первой опоры паровой турбины, представляет собой главную узловую точку распределения рабочей среды «внутри себя» (элементы, выполняющие защитную функцию: золотники отключения турбины, регулятор безопасности) [5] и к гидравлическим узлам органов парораспределения турбины (ЭГП-С, сервомоторы). Штатная подача огнестойкой жидкости (ОЖ) в блок регулирования осуществляется из

блока маслоснабжения, при этом предэксплуатационный разогрев ОЖ до требуемого ЛМЗ диапазона температур от 45 до 55 °С выполняется одним из штатных насосных агрегатов Н1 (Н2) (рис. 2). На энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС после разогрева ОЖ и перевода механизма управления турбины (МУ) в положение 90°, инициирующее рабочее состояние ЭГП-С и взвод стопорных клапанов турбины, появлялась высокочастотная вибрация внутри блока регулирования. Возможность идентифицировать источник вибрации по причине закрытой конструкции блока регулирования отсутствовала. При этом параметры давления ОЖ в блоке регулирования соответствовали требованиям заводской документации. Недлительная работа САРЗ с вибрацией внутри блока регулирования приводила к разрыву сварных швов линии подачи ОЖ на вход в ЗРБ. Дополнительное раскрепление жесткими связями линии ЗРБ к устранению вибрации не приводило. По результатам ревизии обратного клапана ОК1 (рис. 2, 3) зафиксированы разрушения направляющих для движения шарика. Доработка конструкции обратного клапана на площадке ЛМЗ и согласование переноса места установки обратного клапана внутри блока регулирования в непосредственной близости к МУ (рис. 1) привело к устранению вибрации трубок при номинальном температурном режиме работы САРЗ.



Рисунок 1. Внутренние элементы блока регулирования турбины К-1200-6,8/50 (обратный клапан перенесен)

Figure 1. TRPS control block internal components (check valve replaced)

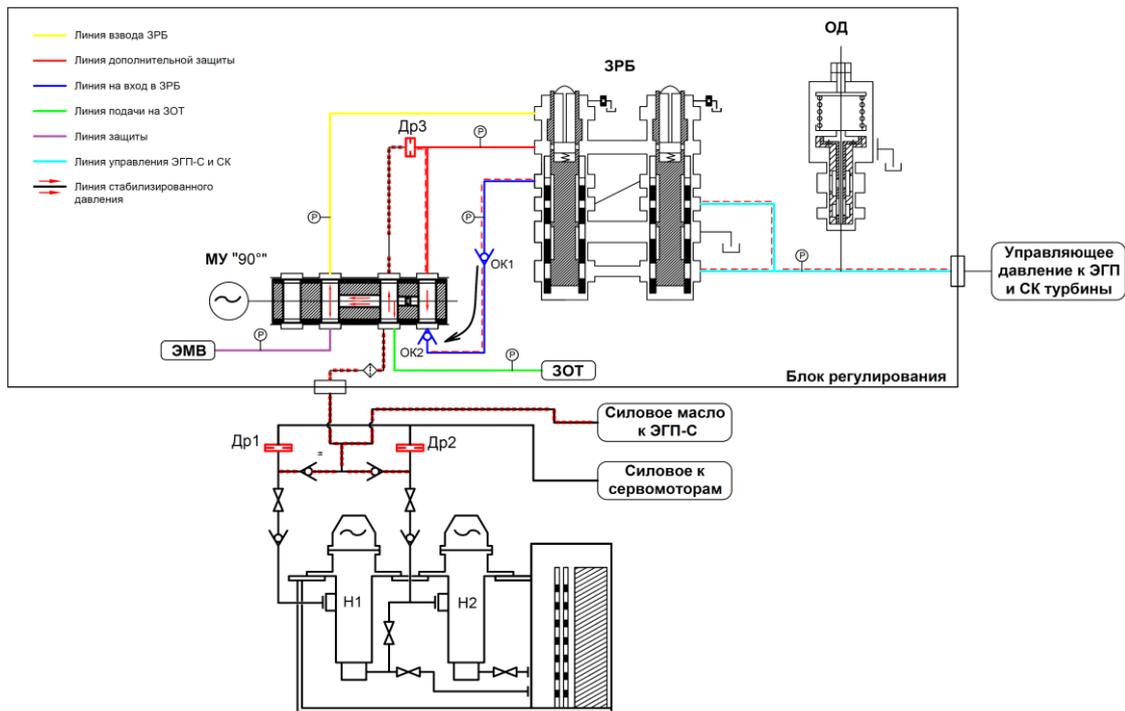


Рисунок 2. Принципиальная схема блока регулирования САРЗ: МУ – механизм управления; ЗРБ – золотники регулятора безопасности; ОД – ограничитель давления; ЗОТ – золотники отключения турбины; ЭМВ – электромагнитные выключатели; Н1, Н2 – маслососы регулирования

Figure 2. Schematic diagram of TRPS control block: GE – governance engine; SSP – safety control spool valves; PR – pressure restrictor; TTSV – turbine trip spool valves; EMS – electromagnetic switcher; P1, P2 – control liquid oil pumps

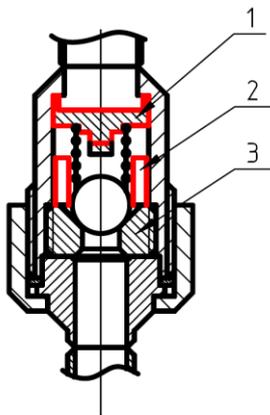


Рисунок 3. Обратный клапан внутри блока регулирования (объем доработки): 1 – доработанная форма упора; 2 – дополнительные направляющие; 3 – седло клапана

Figure 3. Check valve inside TRPS control block (modified): 1 – modified support, 2 – additional railings, 3 – valve seat

Несоответствие параметров давления внутри блока регулирования

Первый ввод в работу САРЗ после проведения послемонтажных очисток и сборки проектной схемы трубопроводов, гидравли-

ческих узлов помимо поиска неплотности системы требует определения соответствия параметров давления внутри блока регулирования (БР) требованиям заводской документации при номинальной температуре ОЖ в диапазоне от 45 до 55 °С. Конструкцией блока регулирования САРЗ турбоустановки К-1200-6,8/50 предусматривается контроль давления ОЖ в линии защиты (Р_{ЗАЩ}), линии к золотникам отключения турбины (Р_{ЗОТ}), линии управляющего давления к сервомоторам стопорных кланов и ЭГП-С (Р_{УПР.СК}), линии на взвод ЗРБ (Р_{ЗРБ}), линии на вход в ЗРБ (Р_{ВХ.ЗРБ}), линии дополнительной защиты (Р_{ДЗ}), причем контроль давлений выполняется в двух режимах работы САРЗ: (1) МУ в положении «0°», (2) МУ в положении «90°». На энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 в режиме (2) зафиксировано отклонение давлений (табл. 1) в линиях Р_{ДЗ}, Р_{ВХ.ЗРБ}, Р_{УПР.СК}, которые непосредственно обеспечивают возможность управления стопорными клапанами турбины и ЭГП-С.

Таблица 1. Параметры БР

Table 1. Control Unit Parameters

Р _{ЗАЩ}	Р _{ДЗ}	Р _{ЗОТ}	Р _{ЗРБ}	Р _{ВХ.ЗРБ}	Р _{УПР.СК}
Номинальные параметры БР, МПа					
5,0	4,1	5,1	5,0	3,4	3,4
Фактические параметры БР, МПа					
5,0	2,3	5,1	5,0	2,2	2,2

Выполнение контрольного протягивания соединений трубок с гидравлическими узлами внутри БР, как мероприятие, являющееся распространенным на этапе пусконаладочных работ, к устранению причины пониженных давлений БР не привело. Вторым мероприятием по устранению описанного несоответствия являлось выполнение ревизии гидравлической части МУ с привлечением специалистов ЛМЗ для поиска причин неоднозначности сборки, соответствия размеров внутренних элементов МУ (золотник, букса, корпус и др.) детализированным чертежам. Основным внутренним элементом МУ, ограничивающим расход ОЖ в режиме рабо-

ты, (2) и, как следствие, возможное снижение давления рабочей среды, является дроссельная шайба диаметром 4 мм (ДР4), установленная в патрубке линии дополнительной защиты (рис. 4). По результатам ревизии МУ и проведенного анализа причин совместно с представителями ЛМЗ выявлено скрытое несоответствие, не позволявшее идентифицировать себя явно по заводским чертежам – местоположение дроссельной шайбы (рис. 4, поз. 2) не соответствовало требованиям чертежа и препятствовало потоку ОЖ в линию дополнительной защиты. Нарезка внутренней резьбы для дроссельной шайбы выполнена сквозной через корпус МУ. В такой конструкции при установке ДР4 стопорение внутри штуцера к линии дополнительной защиты не обеспечивалось, тем самым ограничивался проток ОЖ (ДР4 вкручивалась до упора в буксу золотника (рис. 4, поз. 1).

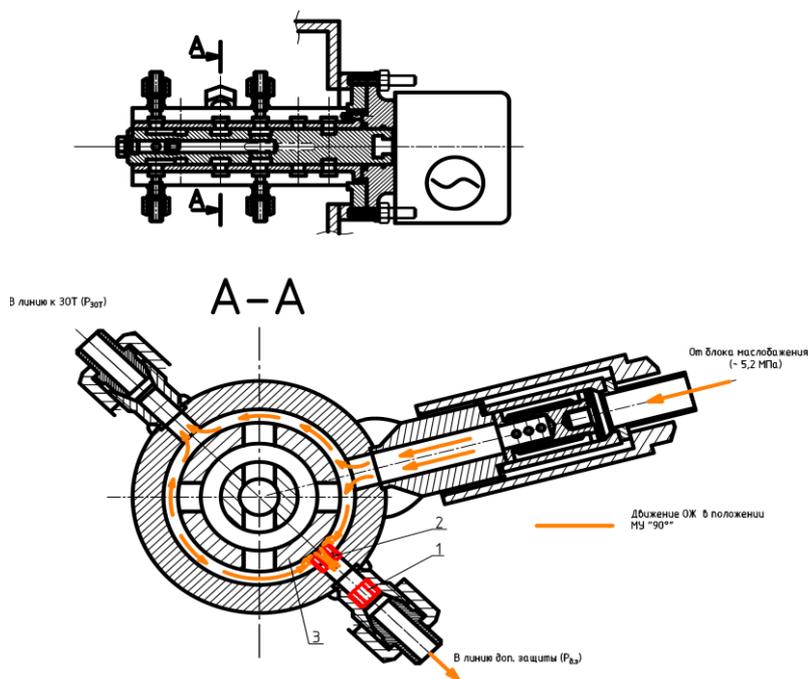


Рисунок 4. Механизм управления БР: 1 – проектное положение дроссельной шайбы; 2 – положение шайбы при ревизии; 3 – букса золотника

Figure 4. Control block governance engine: 1 – throttle design position, 2 – throttle position during inspection, 3 – axle-box of spool valve

Как показывает опыт РФ ввода в эксплуатацию АЭС большой мощности наладочные работы САРЗ турбин

производства ЛМЗ выполняются на завершающем этапе основных пусковых операций вводимого энергоблока (после

проведения холодно-горячей обкатки реакторной установки). Приведенные выше случаи из опыта наладочных работ на первый взгляд кажутся слишком «локальными» и понятными, но, стоит отметить, затраченный временной ресурс на поиск коренных причин для устранения несоизмеримо велик.

Выводы

1. Устранение скрытых несоответствий САРЗ турбин К-1200-6,8/50 в период пусконаладочных на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 подтвердили соответствие заявленных ЛМЗ характеристик как на отдельных гидравлических узлах, так и в процессе комплексного опробования турбоустановки в целом (режим холостого хода, работа под нагрузкой, динамические режимы), в том числе, в части отработки задания по поддержанию заданной мощности турбогенератора или давления пара второго кон-

тура от автоматического регулятора мощности (АРМ) реакторной установки.

2. Выполненные доработки элементов САРЗ турбины энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 были учтены на очередном вводимом энергоблоке № 2 Нововоронежской АЭС-2 в период монтажа турбины (до проведения пусконаладочных работ), что позволило сократить время выполнения настройки ГЧСР в период активного этапа ввода энергоблока.

3. С 2015 г. опыт проведения пусконаладочных работ САРЗ турбины К-1200-6,8/50 энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 распространен на турбины-аналоги однотипных энергоблоков (Ленинградская АЭС-2, Белорусская АЭС) и по настоящее время является востребованным и совершенствуется в РФ и за рубежом по причине необходимости выполнения в периоды ежегодных планово-предупредительных ремонтов АЭС выполнения регламентной настройки САРЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., О.Л. Безручко, И.Н. Гусев, Д.Е. Усачев. Паротурбинная установка К-1200-6,8/50. Воронеж: Диагат, 2021. 499 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=mvvlib> (дата обращения 06.11.2024).
2. Глазер Ф.Ю., Друзь А.Г., Лишук В.В., Сухой Я.И. [и др.]. Наладка и испытание автоматической системы регулирования турбины К-1000-60/3000 ЛМЗ. *Теплоэнергетика*. 1990;11. Режим доступа: <http://unilibrary.ru/articles/journals/teploenergetika/teploenergetika-1990/teploenergetika-1990-11/glazer-fju-druz-ag-dishhuk-vv-suhoy-jai-fragin-ms-chernjavskij-li-volchegorskij-ml-naladka-i-ispitanie-avtomaticheskoy-sistemi-regulirovaniya-turbini-k-1000-603000-lmz.html> (дата обращения: 09.11.2024).
Glazer F.U., Druz A.G., Lishuk V.V., Suhoj Y.I. et al. Commissioning and testing automatic control system of turbine K-1000-60/3000 LMZ. *Thermal Engineering*. 1990;11. Available at: <http://unilibrary.ru/articles/journals/teploenergetika/teploenergetika-1990/teploenergetika-1990-11/glazer-fju-druz-ag-dishhuk-vv-suhoy-jai-fragin-ms-chernjavskij-li-volchegorskij-ml-naladka-i-ispitanie-avtomaticheskoy-sistemi-regulirovaniya-turbini-k-1000-603000-lmz.html> (accessed: 09.11.2024).
3. Фрагин М.С., Онацко А.Ф., Волчегорский М.Л., Комаров Д.В., Усанов М.А. Патент РФ на изобретение № 2154201 от 14.08.98. Механогидравлический преобразователь. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0098115486_20000610_A_RU/ (дата обращения: 06.11.2024).
Fragin M.S., Onatsko A.F., Volchegorskij M.L., Komarov D.V., Usanov M.A. Russia Federation patent on invention № 2154201 dated 14.08.98. Mechanical-hydraulic converter. Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0098115486_20000610_A_RU/ (accessed: 06.11.2024).
4. Фрагин М.С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшая перспектива. Санкт-Петербург: Энерготех, 2005. 247 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002711884/ (дата обращения: 06.11.2024).
5. Фрагин М.С., Щетинин А.А., Волчегорский М.Л., Любан Е.А. и др. Системы регулирования конденсационных турбины большой мощности ЛМЗ. *Теплоэнергетика*. 1972;11. Режим доступа: <https://clck.ru/3HqdB> (дата обращения: 09.11.2024).
Fragin M.S., Schetinina A.A., Volchegorskij M.L., Ljuban E.A. et al. High-power condensing turbines control systems of LMZ production. *Thermal engineering*, 1972; 11. Available at: <https://clck.ru/3HqdB> (accessed: 09.11.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Филатов В.В. – непосредственное участие в проведении пусконаладочных работ, формулировка идей, анализ полученных результатов испытаний, разработка статьи;

Беляков А.А. – методологическая поддержка при написании статьи, подготовка материалов к печати;

Сорокин А.А. – участие в проведении пусконаладочных работ, разработка статьи;

Бодров А.И. – исследование, анализ полученных результатов пусконаладочных работ, формулировка идей о возможных причинах некорректной работы элементов САРЗ;

Варзанов А.В. – анализ полученных результатов пусконаладочных работ, разработка технических решений по доработке конструктивных элементов САРЗ;

Волков Н.С. – обработка, систематизация материалов статьи, подготовка к печати.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Филатов Вячеслав Витальевич, руководитель проекта департамента по реализации проектов ввода энергоблоков в АО «Концерн Росэнергоатом» (центральный аппарат), г. Москва, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0009-0004-8814-972X>
e-mail: Filatov-vv@rosenergoatom.ru

Беляков Андрей Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой атомных электрических станций Ивановского Государственного Энергетического Университета им. В.И. Ленина (ИГЭУ), г. Иваново, Российская Федерация.
e-mail: Bel-aes@ya.ru

Сорокин Александр Александрович, главный специалист Управления шефмонтажа турбинного оборудования ЛМЗ АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: Sorokin_AA3@power-m.ru

Бодров Александр Игоревич, заместитель начальника отдела СКБ «Турбин» АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: Bodrov_AI@power-m.ru

Варзанов Андрей Владимирович, начальник отдела СКБ «Турбина» АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: Varzanov_AV@power-m.ru

Волков Никита Сергеевич, инженер-конструктор СКБ «Турбина» АО «Силловые машины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: Volkov_NS@power-m.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Filatov V.V. – direct participation in the commissioning work, formulation of ideas, analysis of the test results, article development;

Belyakov A.A. – methodological support during the writing of the article, preparation of materials for publication;

Sorokin A.A. – participation in the commissioning work, article development;

Bodrov A.I. – research, analysis of the results of commissioning, formulation of ideas, adoption of technical solutions for the refinement of structural elements;

Varzanov A.V. – result analysis of the commissioning works, the development of technical solutions for the modified structural elements of the TRPS;

Volkov N.S. – processing, systematization of the article materials, preparation for printing.

FUNDING

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vyacheslav V. Filatov, project manager of new nuclear power plants project implementation JCS «Rosenergoatom» (central office), Moscow, Russian Federation.
<https://orcid.org/0009-0004-8814-972X>
e-mail: Filatov-vv@rosenergoatom.ru

Andrey A. Belyakov, Cand. Sci. (Eng.), Head of nuclear power plants department Ivanovo State Power University (ISPU), Ivanovo, Russia Federation.
e-mail: Bel-aes@ya.ru

Aleksandr A. Sorokin, main expert of installation supervision department » JCS «Power Machines», St. Petersburg, Russian Federation.
e-mail: Sorokin_AA3@power-m.ru

Aleksandr I. Bodrov, deputy head of Department SCB «Turbine» JCS «Power Machines», St. Petersburg, Russian Federation.
e-mail: Bodrov_AI@power-m.ru

Andrey V. Varzanov, head of Department SCB «Turbine» JCS «Power Machines», St. Petersburg, Russian Federation.
e-mail: Varzanov_AV@power-m.ru

Nikita S. Volkov, structural engineer of SCB «Turbine» JCS «Power Machines», St. Petersburg, Russian Federation.
e-mail: Volkov_NS@power-m.ru

Поступила в редакцию / Received 17.11.2024

После доработки / Revision 03.02.2025

Принята к публикации / Accepted 06.02.2025

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY



<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-05>

EDN RYMTXH

Оригинальная статья / Original paper

Многоузловая модель динамики реактора ВВЭР-1200 для синтеза системы автоматического регулирования

С.С. Правосуд

*АНО ДПО Техническая академия Росатома, г. Обнинск, Российская Федерация
Северский Технологический Институт НИЯУ МИФИ, г. Северск, Российская Федерация*

✉ ssepravosud@rosatom.ru

Аннотация. В данной работе предложена и смоделирована в среде MATLAB многоточечная модель динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящая из различной совокупности моделей многоточечной кинетики, определенной в рамках подхода связанных реакторов Эйвери в аксиальном направлении. Количество рассмотренных моделей составляет от двух до двадцати. Для более точного описания динамических режимов работы реактора модель была расширена теплогидравлической моделью Манна, в рамках которой предполагается, что к одному топливному узлу примыкает два узла последовательных узла теплоносителя. Для моделирования суточных маневренных режимов были учтены пространственные ксеноновые колебания и введен параметр Axial Xenon Oscillation Index. В работе также предложена новая математическая многоузловая модель воздействия борной кислоты, полученная из модели изменения концентрации борной кислоты в геометрии канала. Данная модель связана с моделью теплогидравлических процессов через массовый расход теплоносителя. Результаты численного моделирования в двух экспериментах: при изменении положения 12 группы органов регулирования системы управления и защиты, а также концентрации жидкого поглотителя в теплоносителе первого контура показывают, что статистическая точность предложенной модели является более чем удовлетворительной в сравнении с многофункциональным тренажером, а общий вид переходных процессов согласуется с физическими представлениями. Представленная работа способствует дальнейшему развитию связанных в нейтронно-физическом смысле точечных моделей ядерного реактора для улучшения синтеза автоматического регулятора мощности.

Ключевые слова: ВВЭР, динамика реактора, моделирование, MATLAB, многоузловая модель, многоточечная кинетика, режим следования за нагрузкой, модель Эйвери, модель Манна, аксиальный офсет, ксеноновые колебания, верификация.

Для цитирования: Правосуд С.С. Многоузловая модель динамики реактора ВВЭР-1200 для синтеза системы автоматического регулирования. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):40–59. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-05>

For citation: Pravosud S.S. Multi-node model of VVER-1200 reactor dynamics for automatic control system synthesis. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):40–59. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-05>

Multi-node model of VVER-1200 reactor dynamics for automatic control system synthesis

Sergei S. Pravosud

*Rosatom Technical Academy, Obninsk, Russian Federation
Seversk Technological Institute the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk,
Russian Federation*

✉ ssepravosud@rosatom.ru

Abstract. This paper presents multipoint kinetics of the VVER-1200 nuclear reactor model determined under the Avery coupled reactors formulation. Different numbers, from two to twenty, of axial nodes are modelled in MATLAB. For a more precise description of the transient's nature, this model was extended by Mann's thermal hydraulic model. Within the frame of Mann's approach, one fuel node is adjacent to two coolant nodes. For daily maneuvering modes space-dependent xenon oscillations are considered and the Axial Xenon Oscillation Index is introduced. This paper also intro-

duces the novel nodal mathematical model of the boron acid which is coupled with thermal hydraulic model by coolant mass flow rate. The computational results show that the accuracy of the proposed model is more than satisfactory, and general assumptions about transients align with their physical definitions. This research contributes to the advancement of the point-like nuclear reactor modeling for further improvement of the automatic power controller design.

Keywords: VVER, reactor dynamics, modelling, MATLAB, multi-node model, multipoint kinetics, load-following mode, Avery's model, Mann's model, axial offset, xenon oscillations, verification.

Введение

К 2050 г. ядерная энергия по ожиданиям МАГАТЭ станет доминирующей на мировом энергетическом рынке, и реалистичные прогнозы указывают на значительное увеличение мощности, вырабатываемой АЭС по всему миру – до 792 ГВт для удовлетворения растущего спроса на низкоуглеродную электроэнергию. Поскольку страны стремятся сократить выбросы парниковых газов, роль передовых ядерных технологий становится все более важной [1].

Современные исследования подчеркивают важность внедрения сложных стратегий управления для повышения безопасности и эффективности реакторов с водой под давлением (PWR). Передовые системы управления, например, методы на основе нейронных сетей (Neural Networks Based Control) для реакторов с водой под давлением, показаны в работе Жоу и Тана [2]. Авторами рассмотрены, среди прочего, нейро-ПИД управление и нейро-предиктивное-ПИ управление. В стратегии нейро-ПИД управления параметры классического ПИД регулятора подстраиваются под изменяющуюся динамику объекта управления в режиме реального времени для оптимизации производительности и снижения рисков, связанных с потенциальными авариями. В стратегии нейро-предиктивного-ПИ управления прогнозирующая функция нейронной сети объединена с классическим ПИ-регулятором. При таком использовании нейронная сеть имеет две основные функции: первая – использование в качестве модуля прогнозирования для оптимизации параметров обычного ПИ-регулятора, вторая – использование в контуре системы управления для прогнозирования изменения параметров сложной и нелинейной системы такой как ядерный реактор. Стратегия нейро-предиктивного-ПИ управления может быть реализована на рос-

сийских ВВЭР-1200, так как подавление аксиальных ксеноновых колебаний с помощью автоматического регулятора мощности (АРМ), в основе которого лежит классический пропорционально-интегральный закон управления, без привлечения дополнительных управляющих воздействий не позволяет удерживать значение аксиального офсета в границах офсетномощностной диаграммы [3].

Сравнительный обзор моделирования современных стратегий управления, таких как управление на нечеткой логике (Fuzzy Logic Control), управление в скользящем режиме (Sliding Mode Control), линеаризация обратной связью (Feedback Linearization Control), прогнозирующее управление моделью (Model Predictive Control), глубокое обучение (Deep Learning), обучение с подкреплением (Reinforcement Learning), алгоритм суперскручивания (Super Twisting Algorithm) и других, проведен Донгом и др. [4]. Ими также отмечено, что моделирование стратегии управления является важной частью, гарантирующей устойчивость замкнутой системы, стабильные рабочие точки и удовлетворительные переходные процессы. С другой стороны, адекватность разработанных стратегий управления сильно зависит от выбора математической модели объекта управления, и в настоящий момент используются два основных подхода:

1) моделирование на основе физических законов (Mechanism-Based Modeling), базирующийся на уравнении кинетики нейтронов, сопряженной с моделью теплогидравлических процессов. Такие модели часто представляют в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), а также передаточных функций;

2) второй тип моделей представляют собой модели на основе данных (черный ящик), и определение параметров модели с заданной топологией происходит исключительно на основе эксплуатационных данных.

Следует отметить, что оба подхода к моделированию имеют недостатки: ухудшение производительности моделей на основе физических законов в основном вызвано невозможностью смоделировать точную динамику, а также неопределенностью параметров, в то время как ухудшение производительности моделей на основе данных в основном обусловлено отсутствием адекватного числа обучающих выборок, поэтому в некоторых случаях используются гибридные модели, нивелирующие вышеперечисленные недостатки.

Так как ядерный реактор является объектом с распределенными параметрами [5], то использование ДУЧП для моделирования его динамики выглядит оптимальным. Например, уравнение распределения тепла в ТВЭЛ в простейшем случае имеет следующий вид (1):

$$C_p \rho \frac{\partial z(x, t)}{\partial t} = K_0 \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2}, x \in (0, L), t \geq 0 \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость стержня;

ρ – плотность стержня;

K_0 – теплопроводность стержня;

L – длина стержня.

Уравнение (1) также может описывать диффузию нейтронов. Получить передаточную функцию для систем с распределенными параметрами, такими как уравнение (1), в целом возможно, однако ее вид, а также расположение нулей и полюсов передаточной функции, сильно зависит от выбора граничных условий, что естественно будет оказывать значительное влияние на производительность регулятора системы управления [6]. В исследовании Бриджеса [7] получены передаточные функции для двугруппового уравнения диффузии нейтронов с обратными связями по температуре топлива и замедлителя в отношении расположения внешнего источника нейтронов в активной зоне, однако автор считает их аналитический вид достаточно громоздким для включения в данную статью. В таком случае использование

системы ОДУ (моделей со сосредоточенными параметрами) выглядит предпочтительнее.

В своей работе Шимжит [и др.] отмечает, что модели, используемые для детальных расчетов активной зоны реактора, не всегда подходят для синтеза системы управления, требующей в большинстве случаев моделей низкого порядка [8]. Среди различных методов моделирования узловым методом (Nodal Method) или многоточечная модель кинетики (Multipoint Kinetics) больше подходит для данной задачи благодаря своей простоте, а сама структура уравнений позволяет прямо выбирать переменные для представления в форме пространства состояний. Полученная таким образом модель усовершенствованного реактора на тяжелой воде АНWR имеет гораздо меньший порядок, чем та, которая использовалась для детального расчета. Также отмечено, что схема, состоящая из 17 узлов, будет подходящей для исследований, связанных с пространственным управлением АНWR, поскольку она включает в себя все основные свойства линейной системы, и в то же время демонстрирует удовлетворительную точность моделирования стационарного состояния и переходных процессов.

Ванг с соавторами представил узловую модель реактора с водой под давлением AP-1000, являющуюся актуальной задачей ввиду значительного отношения высоты активной зоны к ее диаметру [9]. Предложенная узловая модель основана на разделении активной зоны реактора AP1000 на ряд узлов как вдоль аксиальной оси реактора, так и в радиальном направлении. Оптимальная схема деления представляет собой 14 аксиальных узлов и 6 радиальными узлов, соответственно. Результаты численного моделирования показали, что разработанная модель может довольно точно отражать не только осредненную информацию по объему активной зоны, но и информацию о пространственных распределениях, такую как аксиальный офсет и профиль распределения температуры топлива.

В своей работе Донг [и др.], мотивированные фактом недостатка классической модели динамики реактора ВТГР, основанной на лишь точечной кинетике, и необходимо-

стью получения более точной модели активной зоны для моделирования системы управления, получили многоточечную модель кинетики нейтронов, а также представили соответствующую многоузловую теплогидравлическую модель, суммарно состоящую из 10 узлов в аксиальном направлении [10]. Результаты численного моделирования показали, что предлагаемая модель активной зоны имеет высокую точность описания переходных процессов при ступенчатом изменении реактивности, а также при изменениях расхода и температуры гелия на входе в активную зону. Важной особенностью разработанной модели является то, что она позволяет отслеживать изменение аксиального офсета.

В своих работах Пучальски с соавторами [11,12] расширили теплогидравлическую модель Манна [13] с использованием коэффициентов распределения тепловой мощности, получив в итоге многоузловую модель типового реактора PWR. Сама модель Манна предполагает, что к одному топливному узлу примыкает два узла теплоносителя, что демонстрирует лучшую производительность по сравнению с традиционной моделью, где к одному топливному узлу примыкает один узел теплоносителя, а температура узла теплоносителя предполагается равной полусумме входной и выходной его температур [14]. Главным преимуществом подхода расширенной многоузловой модели, полученной Пучальски с соавторами, является то, что температуры в различных зонах активной зоны реактора могут быть оценены более точно, что позволяет разработать более совершенные системы управления активной зоной реакторов с водой под давлением. Более того, полученная модель была кросс-верифицирована с ПО Argos [15], которое используется для моделирования переходных процессов.

При всех вышеперечисленных достоинствах, представленные модели [8–12] не лишены своих недостатков: математическая модель реактора ВТГР не включает в себя обратные связи по ксенону, модель реактора АНWR не включает в себя явную модель теплогидравлических процессов, многоузловая типовая модель PWR не рассматривает в

явном виде многоточечную кинетику, а лишь использует коэффициенты энерговыделения в различных узлах ТВЭЛ. Модель AP-1000 выглядит более точной с точки зрения моделирования физических процессов, однако она, как и другие модели, не включает в себя явную модель органов регулирования, что не позволяет исследовать режим следования за нагрузкой и установить передаточную функцию в координатах «положение ОР СУЗ – мощность реактора» или «положение ОР СУЗ – аксиальный офсет». Для устранения последнего недостатка автором в [16] предложена многоточечная модель ВВЭР-1200 и явная модель органов регулирования, использующая комбинацию функций знака sign и учитывающая нелинейную характеристику органов регулирования по высоте, позволяющая воздействовать на узлы последовательно при их вводе. Однако, такая нелинейная модель для простоты моделирования переходных процессов была охвачена лишь мощностной обратной связью. Более того, в работах [9,11,12,16] не учитывается возможность борного регулирования.

Большинство работ, ставящих целью разработку системы управления аксиальным офсетом в режиме следования за нагрузкой, ограничиваются либо двумя, либо четырьмя аксиальными узлами. Например, Маусказми предложил адаптацию параметров ПИД-регулятора для двухточечной модели типового реактора PWR используя оптимизацию методом роя частиц [17]. Афтаб и Луан [18] смоделировали регулятор на нечеткой логике методом Такаги–Сугено для управления мощностью для ВВЭР-1000 для достижения точного следования за нагрузкой в ситуациях с различными внешними возмущениями и внутренними неопределенностями модели на основе двухточечного подхода. Для поддержания аксиальных ксеноновых колебаний в заданных пределах, Элиаси [и др.] предложили робастное управление с предсказанием, основываясь на двухточечной модели [19], в то время как Рафизель [и др.] ограничились дробно-пропорциональным ПИД законом регулирования [20]. Абдулрахим с соавторами использовали адаптивное управление в скользящем режиме второго порядка, способное эффективно подавлять

ксеноновые колебания в режиме следования за нагрузкой, базируясь на верифицированной четырехточечной модели реактора ВВЭР-1000 [21]. Исходно данная модель была предложена Зайдабади и Ансарифаром [22,23] для адаптивного робастного управления в режиме следования за нагрузкой и моделирования робастного наблюдателя состояний для подавления возникающих ксеноновых колебаний. Используя четырехточечную модель реактора ВВЭР-1000 Афтах [и др.] смоделировал адаптивный нечеткий регулятор и продемонстрировал его преимущество перед традиционным ПИД регулятором в режиме следования за нагрузкой [24]. Используя многоузловой подход, Зареи [25] смоделировал классические ПИ-регуляторы для МИМО-моделей.

Приведенные выше работы [17–25] рассматривали возможность оптимального управления только с использованием органов регулирования СУЗ, хотя Зареи [26] обосновал в частотной области, что использование борного поглотителя, способное воздействовать мгновенно на все аксиальные узлы, предпочтительнее для подавления ксеноновых колебаний, хотя им и не была использована явная модель борного поглотителя: ее воздействие было представлено только в виде коэффициентов матрицы возмущения, воздействующей сразу на верх и нижнюю активную зону модели реактора, представленной в форме пространства состояний.

Исходя из вышеперечисленного, в данной работе предложены и исследованы различные многоузловые модели реактора ВВЭР-1200, состоящие из различного числа аксиальных узлов – от двух до двадцати, комбинирующие многоточечную кинетику с расширенной теплогидравлической моделью Манна, а также охваченные обратной связью

по ксенону для исследования пространственных ксеноновых колебаний, учитывающие явную модель органов регулирования СУЗ, а также представлена многоузловая модель борной кислоты, использующая подход Р. Манна «two well-stirred tanks in series», и влияющая последовательно на реактивность в аксиальных узлах. Моделирование проводилось в MATLAB Simulink и все модели написаны на языке MATLAB как S-functions lv. 2.

Многоточечная модель кинетики Эйвери

В данной работе многоточечная модель кинетики реактора основывается на теории связанных реакторов, предложенной Эйвери [27] в 1958 г., которая затем была расширена Беллени-Моранте [28] в 1964 г. и уточнена Коматой [29] в 1969 г. Детальное сравнение многоточечного подхода Эйвери с моделью точечной кинетики, а также с многоточечным подходом Кобояши [30], который развил идеи Эйвери, было проведено Валлочи с соавторами [31]. Они внедрили данные подходы в код APPOLO3 и исследовали переходные процессы в типовом ядерном реакторе на тепловых нейтронах. Полученные результаты показывают, что в рассмотренных случаях имеются незначительные различия между формализмами Эйвери и Кобояши. Также Валлочи с соавторами обосновано, что детальное подразделение активных зон в рассмотренных случаях оказывает небольшое влияние на точность поведения системы. С этой точки зрения важно разделять области с различными свойствами [32], такими как реактор – подкритическая сборка.

Уравнение многоточечной кинетики может быть записано следующим образом (2) [8–10,16–26]:

$$\begin{cases} \frac{dn_j(t)}{dt} = \frac{\rho_j - \beta}{\Lambda} n_j(t) + \sum_{i=1}^3 \lambda_i C_{ji}(t) + \frac{Dv}{\Delta Hd} (n_{j+1}(t) + n_{j-1}(t) - 2n_j(t)) \\ \frac{dC_{ji}(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n_j(t) - \lambda_i C_{ji}(t) \end{cases} \quad (2)$$

где $n(t)$ – плотность тепловых нейтронов (см^{-3});

$C_i(t)$ – концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов (см^{-3});

Λ – время жизни нейтронов (сек);

ρ – внешняя реактивность;

β – суммарная доля запаздывающих нейтронов $\beta = \sum_i^3 \beta_i$;

λ_i – постоянная распада i -ой группы ядер – предшественников запаздывающих нейтронов (сек^{-1});

D – коэффициент диффузии между узлами (~ 0.16 см);

v – скорость тепловых нейтронов ($\sim 2.2 \times 10^5 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$);

ΔH – высота узла (см);

d – расстояние между центрами двух соседних узлов (см).

Следует отметить, что в уравнении (2) только соседние узлы связаны между собой на основании диффузионного подхода. В данной работе также используется трегрупповая модель для ядер-предшественников запаздывающих нейтронов, предложенная Скиннером и Коэном [33], хорошо проявившая себя в сравнительном тесте с шести и восьмигрупповыми приближениями, значи-

тельно экономя время вычислений и практически не влияя на статистическую точность результатов [16]. Данный подход был использован и в других работах [17,21–23].

Расширенная модель теплогидравлических процессов Р. Манна

При описании теплогидравлических процессов в активной зоне ядерного реактора необходимо включать уравнения, описывающие сохранение энергии, импульса и массы теплоносителя. Однако общий подход может быть упрощен при допущении, что теплоноситель имеет постоянную плотность, и давление с массовым расходом не изменяются, что позволяет исключить из рассмотрения уравнения для сохранения массы и импульса. Также для дальнейшего упрощения будем считать, что изменение температуры теплоносителя, вызванное его нагревом из-за взаимодействия с тепловыделяющими элементами, происходит только в осевом направлении, а направление теплопередачи от узла топливных элементов к узлам теплоносителя – в радиальном. Для двух топливных узлов и четырех узлов теплоносителя модель Р. Манна может быть представлена в следующем виде (3) [11,12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_T}{2} \gamma_T \frac{d\bar{T}_1(t)}{dt} = \alpha_1 \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} \frac{S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ \frac{m_{\text{ТН}}}{4} \gamma_{\text{ТН}} \frac{d\bar{\theta}_{11}(t)}{dt} = \alpha_1 \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) - G_{\text{ТН}} \gamma_{\text{ТН}} (\bar{\theta}_{11}(t) - \theta_{\text{вх}}) \\ \frac{m_{\text{ТН}}}{4} \gamma_{\text{ТН}} \frac{d\bar{\theta}_{12}(t)}{dt} = \alpha_1 \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) - G_{\text{ТН}} \gamma_{\text{ТН}} (\bar{\theta}_{12}(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) \\ \frac{m_T}{2} \gamma_T \frac{d\bar{T}_2(t)}{dt} = \alpha_2 \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} \frac{S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ \frac{m_{\text{ТН}}}{4} \gamma_{\text{ТН}} \frac{d\bar{\theta}_{21}(t)}{dt} = \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) - G_{\text{ТН}} \gamma_{\text{ТН}} (\bar{\theta}_{21}(t) - \bar{\theta}_{12}(t)) \\ \frac{m_{\text{ТН}}}{4} \gamma_{\text{ТН}} \frac{d\bar{\theta}_{22}(t)}{dt} = \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) - G_{\text{ТН}} \gamma_{\text{ТН}} (\bar{\theta}_{22}(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) \end{array} \right. \quad (3)$$

где P – тепловая мощность ядерного реактора (МВт);

\bar{T}_i – среднее значение температуры топливных элементов в узле ($^{\circ}\text{C}$);

ε – доля энергии, выделяющаяся непосредственно в топливе (~97%);

$S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности теплообмена (м^2),

$K_{\text{тепл}}$ – коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{C}}$);

m_{T} – масса топливных элементов (кг);

γ_{T} – удельная теплоемкость топливных элементов ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\text{C}}$);

G_{TH} – массовый расход теплоносителя через реактор ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$);

m_{TH} – суммарная масса теплоносителя в активной зоне (кг);

γ_{TH} – удельная теплоемкость теплоносителя ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\text{C}}$);

$\bar{\theta}_{i1}(t), \bar{\theta}_{i2}(t)$ – усреднённые поперек канала теплоносителя температуры в первом и

втором узлах, примыкающие к i -му топливному узлу соответственно ($^{\circ}\text{C}$);

α_i – коэффициент, учитывающий энерговыделение в узле из-за перемещения органов регулирования.

В работах [11,12] приведены расчетные обоснования для определения коэффициента α_i при изменении положения органов регулирования. Однако, использование лишь одноточечной модели кинетики в данных работах не позволяет вычислить аксиальный офсет в явном виде, который определяется как уравнение (4):

$$AO = \frac{P_{\text{верх}} - P_{\text{низ}}}{P_{\text{верх}} + P_{\text{низ}}} \quad (4)$$

где $P_{\text{верх}}, P_{\text{низ}}$ – мощность в верхней и нижней половине активной зоны, соответственно.

Поэтому в данной работе предлагается следующая вариация расширенной модели Р. Манна (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_{\text{T}}}{2} \gamma_{\text{T}} \frac{d\bar{T}_1(t)}{dt} = \varepsilon P_1(t) - K_{\text{тепл}} \frac{S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{11}(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P_1(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{11}(t) - \theta_{\text{вх}}) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{12}(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P_1(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{12}(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) \\ \frac{m_{\text{T}}}{2} \gamma_{\text{T}} \frac{d\bar{T}_2(t)}{dt} = \varepsilon P_2(t) - K_{\text{тепл}} \frac{S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{21}(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P_2(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{21}(t) - \bar{\theta}_{12}(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{22}(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P_2(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{22}(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) \end{array} \right. \quad (5)$$

где P_1, P_2 – мощности, выделяемые в соответствующих узлах на основании многоточечного подхода.

Наглядно разница двух подходов может быть представлена на рисунке (1).

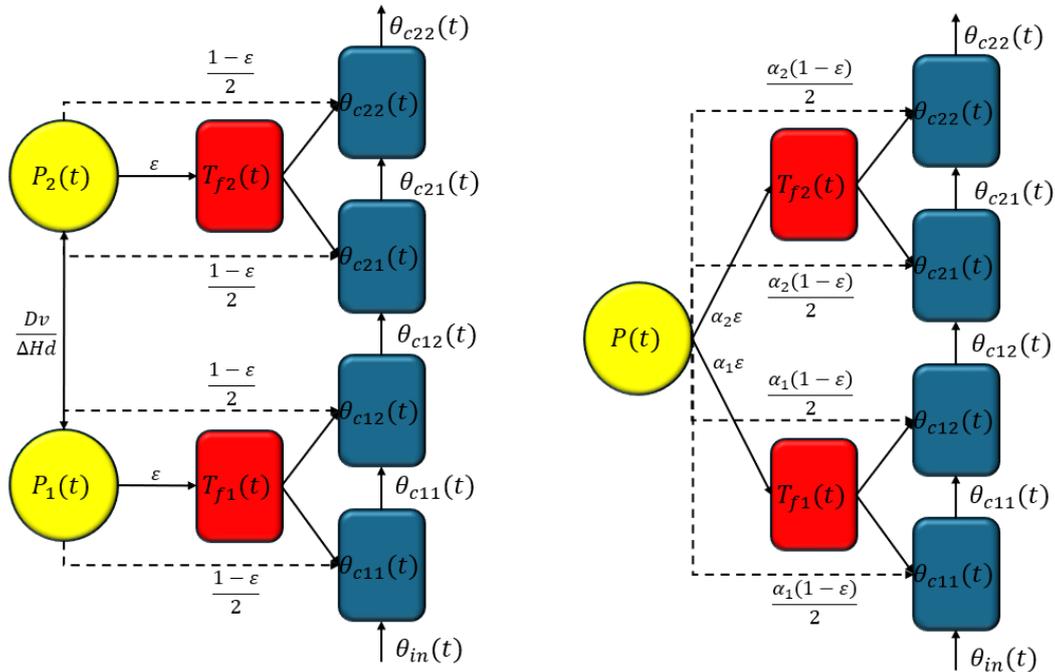


Рисунок 1. Предложенная модель (слева) и подход Пучальски [и др.] (справа)
Figure 1. Suggested approach (left) and approach of B. Puchalski [et. al] (right)

Известно, что температурные эффекты реактивности имеют важный вклад в возможности саморегулирования реактора типа ВВЭР/PWR. При этом коэффициент реактивности по температурам топлива и тепло-

носителя не является постоянной величиной, а зависит, в том числе, от мощности реакторной установки [9]. Эффект реактивности в i -ом узле при изменении температур в нем определим как выражение (6) [18,21–24]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{Ti}(t) = \left(\frac{P_i}{P_{\text{общ}}} - \frac{4.24}{i} \right) (\bar{T}_i(t) - \bar{T}_{i0}) 10^{-5} \\ \rho_{THi}(t) = \left(\frac{-4P_i}{P_{\text{общ}}} - \frac{17.3}{i} \right) (\bar{\theta}_{i1}(t) - \bar{\theta}_{i10} + \bar{\theta}_{i2}(t) - \bar{\theta}_{i20}) 10^{-5} \end{array} \right. \quad (6)$$

В выражениях (5) введена поправка на использование числа узлов i в соответствии с ранее представленной работой автора [16].

Для определения мощности, выделяющейся в соответствующих узлах $P_1 \dots P_i$ где i – число аксиальных узлов, были использованы данные о линейном энерговыделении по наиболее энергонагруженной ТВС (10-29) с многофункционального тренажера реактора ВВЭР-1200 (АНО ДПО Техническая академия Росатома) производства ИТЦ «ДЖЭТ» Росатома.

В основе математической модели тренажера лежит аттестованный расчетный код

для энергоблоков АЭС с ВВЭР CMS (Compressible Media Solver). Моделирование осуществлялось при перемещении рабочей 12 группы ОР СУЗ и изменении концентрации борного поглотителя в теплоносителе первого контура. При этом мощность реакторной установки варьировалась в пределах 100-80% от номинальной. Полученные данные представлены в таблицах 1 и 2, а также приведены на рисунках 2 и 3 вместе с аппроксимирующими полиномами пятой степени (коэффициент детерминации $R^2 > 0.99$).

При определении мощности в i -ом узле использовался следующий подход: на основании аппроксимирующего полинома для 100% уровня мощности (начало моделирования) на соответствующих высотах были определены значения линейного энерговыделения. Затем эти значения делились на сумму всех значений и таким образом определялась относительное

энерговыделения в процентах % от общей. Полученное число умножалось на общую мощность реакторной установки, что позволяло определить значение мощности в i -ом узле. На рисунке 3 приведены результаты расчета аксиального офсета на основе аппроксимирующих полиномов для всех уровней мощности.

Таблица 1. Экспериментальные параметры при изменении положения 12 группы ОР СУЗ

Table 1. Experimental data while inserting the group 12 of the CPS CR

№ ДПЗ	Линейное энерговыделение по наиболее энергонагруженной ТВС (10–29) $Q_L, \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$				
	100%	95%	90%	85%	80%
7	122.9	94.3	81.5	72.4	67.2
6	214.1	181.0	153.9	133.6	133.6
5	275.5	257.7	233.7	201.8	201.8
4	309.8	302.5	289.4	266.9	266.9
3	309.8	307.2	300.3	286.5	286.5
2	266.1	265.4	261.7	253.2	253.2
1	163.1	163.0	161.2	156.7	156.7
Положение 12 группы ОР СУЗ, %	90	77.9	69.2	62.3	57.5
Аксиальный офсет, %	-9.31	-14.20	-18.25	-21.91	-24.02

Таблица 2. Экспериментальные параметры при изменении концентрации борного поглотителя в реакторе

Table 2. Experimental data while changing boron acid concentration

№ ДПЗ	Линейное энерговыделение по наиболее энергонагруженной ТВС (10–29) $Q_L, \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$				
	100%	95%	90%	85%	80%
7	124.1	117.7	113.7	108.8	103.5
6	215.8	203.8	196.0	187.0	177.1
5	277.9	261.9	250.2	237.4	224.0
4	311.9	293.1	277.9	262.3	246.0
3	311.6	290.3	272.6	255.5	237.9
2	267.5	246.8	229.4	213.3	197.0
1	163.9	149.6	137.7	127.1	116.3
Концентрация БК в реакторе, г/кг	5.39	5.41	5.48	5.51	5.55
Аксиальный офсет, %	-9.18	-8.11	-6.97	-6.12	-5.23

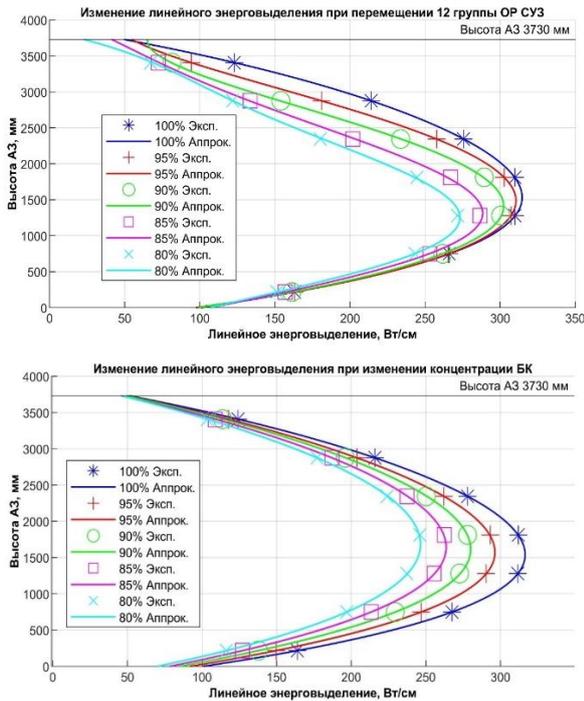


Рисунок 2. Линейное энерговыделение по наиболее энергонагруженной ТВС при варьировании мощности реактора

Figure 2. Linear power density distribution on the most energy loaded fuel assembly while varying reactor power

Затем полагая равными нулю левые части системы (3) (равновесное состояние) определялись начальные температуры топлива и теплоносителя в i -ых узлах. Их

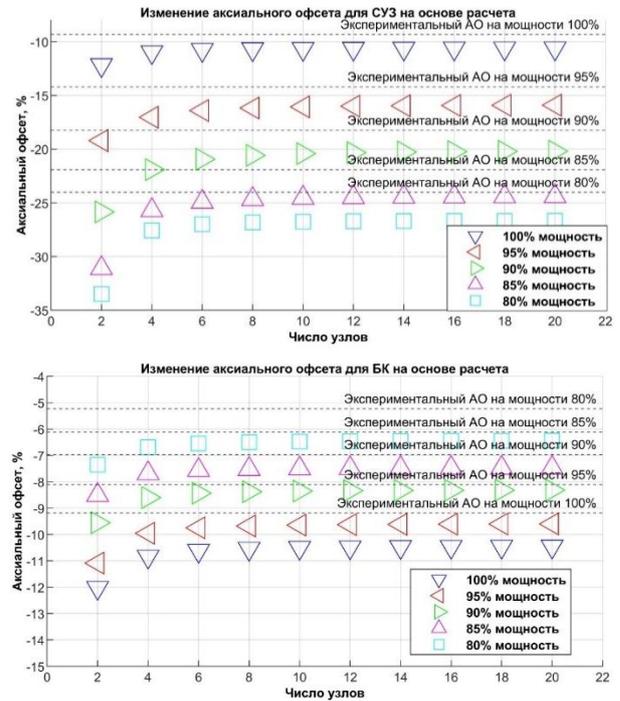


Рисунок 3. Определение расчетного аксиального оффсета на основе аппроксимации для равновесных состояний

Figure 3. Determination of the calculated axial offset based on approximation of steady states

визуализация при разном значении аксиальных узлов для 100% уровня мощности приведена на рисунке 4.

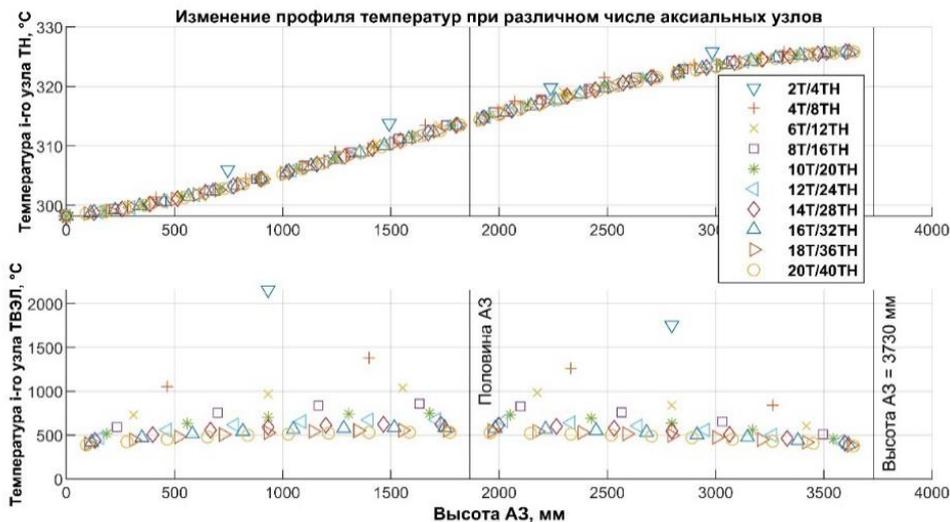


Рисунок 4. Определение профиля температур в активной зоне при различном числе использованных аксиальных узлов на уровне мощности 100%

Figure 4. Determination of temperature profiles in the reactor core with different numbers of axial nodes on 100% power

Из рисунков 3 и 4 вытекает важное следствие: увеличение числа аксиальных узлов должно приводить к улучшению моделирования аксиального оффсета и значительно улучшать точность расчета температур узлов ТВЭЛ, при этом, практически не оказывая влияние на расчет температур в узлах теплоносителя. На рисунке 5 на примере модели,

состоящей из 10 узлов, продемонстрирована адекватность предложенного расширенного подхода многоточечной модели. Изменение температур соответствующих узлов в равновесных состояниях при различных уровнях мощности при условии неизменной температуры теплоносителя на входе в АЗ приведена на рисунке 5.

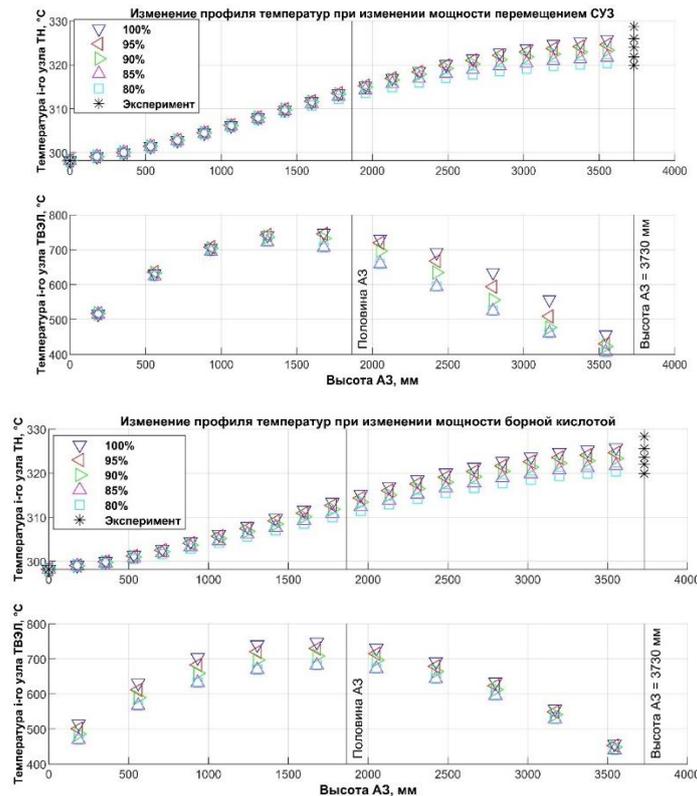


Рисунок 5. Определение профиля температур при варьировании мощности реактора на примере десятиточечной модели на основе расчета при равновесных состояниях

Figure 5. Determination of the temperature profiles while varying reactor power on the example of ten axial nodes model in steady states

Модель пространственных ксеноновых колебаний

Реакция деления в активной зоне реактора ВВЭР приводит к накоплению осколков, обладающих сравнительно большим микроскопическим сечением поглощения в области тепловых нейтронов. Одним из таких элементов является ксенон-135, влияющий на реактивность реактора через процесс, известный как отравление. В рамках подхода сосредоточенными параметрами модель изменения концентрации ксенона-135 может быть записана в виде уравнения (7) [18,19, 21,23,24]:

$$\begin{cases} \frac{dX_i(t)}{dt} = \frac{\gamma_x P_i(t)}{GV_i} + \lambda_I I_i(t) - \left(\lambda_x + \frac{\sigma_a^x P_i(t)}{GV_i \Sigma_f} \right) X_i \\ \frac{dI_i(t)}{dt} = \frac{\gamma_I P_i(t)}{GV_i} - \lambda_I I_i(t) \\ \rho_x(t) = - \frac{\sigma_a^x (X_i(t) - X_{i0})}{v \Sigma_f} \end{cases} \quad (7)$$

где X_i – концентрация ксенона в i -ом узле;

P_i – мощность в i -ом узле;

γ_x – удельный выход ксенона на один акт деления;

γ_I – удельный выход йода на один акт деления;

λ_X – постоянная распада ксенона;
 λ_I – постоянная распада йода;
 G – энергия, выделяемая при одном акте деления;
 V_i – объем i -го узла;
 Σ_f – макроскопическое сечение деления урана-235;
 σ_a^X – микроскопическое сечение поглощения ксенона тепловых нейтронов.

Для того, чтобы продемонстрировать аксиальные ксеноновые колебания в рамках точечного подхода, определим относительную величину AXOI (Axial Xenon Oscillation Index), заданную выражением (8), предложенную Элиаси [и др.] [19], а также используемую специалистами в качестве критерия качества работы смоделированных систем управления [18,23,24]:

$$AXOI = \frac{X_{\text{верх}}(t) - X_{\text{низ}}(t)}{X_{\text{верх}0} + X_{\text{низ}0}} \quad (8)$$

На рисунке 6 представлены данные AXOI при различном числе использованных аксиальных узлов для различных уровней мощности, полученных на основании аппроксимирующих полиномов. Равновесная концентрация ксенона в i -ом узле определялась, полагая равной нулю левую часть уравнений в системе (4) с учетом мощности, выделяющейся в i -ом узле.

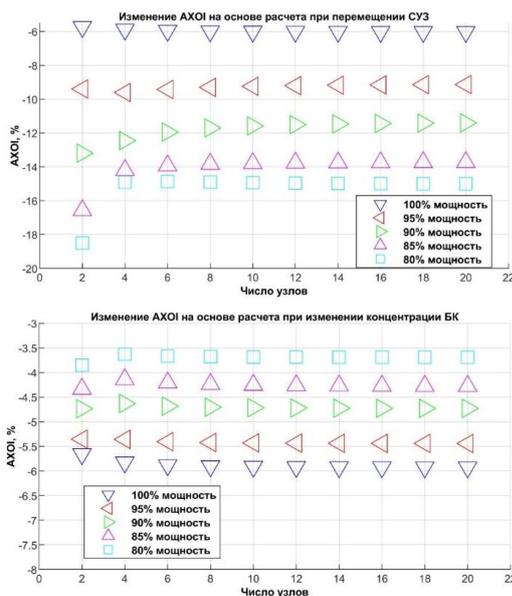


Рисунок 6. Определение расчетных значений AXOI на основе аппроксимации

Figure 6. Determination of the AXOI calculated values based on approximations

Исходя из рисунков 3, 4 и 6 можно установить, что модель, состоящая из двух аксиальных узлов, имеет сравнительно большое отличие аксиального офсета от экспериментального, а также большие ошибки при моделировании профиля температур, что позволяет не учитывать двухточечный подход в дальнейшем моделировании.

При маневрах мощности реакторов ВВЭР-1000/1200 аксиальный офсет должен поддерживаться в определенных значениях [34], определенными формулами (9):

$$\begin{cases} AO_{\text{центр}} = -2.6 + (AO_{\text{стаб}} + 2.6) \frac{P_{\text{стаб}}}{100} \\ AO_{\text{верх}} = -2.6 + (AO_{\text{центр}} + 7.6) \frac{100}{P} \\ AO_{\text{низ}} = -2.6 + (AO_{\text{центр}} - 2.4) \frac{100}{P} \end{cases} \quad (9)$$

Расширенная многоузловая модель борной кислоты

Как отмечалось выше, в работе [26] полученные М. Зареи данные показывают, что схема подавления колебаний с использованием борного поглотителя обладает более устойчивой структурой, чем с использованием ОР СУЗ. Поэтому в рамках разработки нелинейной модели для синтеза системы управления ее необходимо дополнить моделью борной кислоты, но при этом сохраняя саму структуру точечной модели.

В соответствии с работой Хао Ю [и др.] [35], изменения концентрации борной кислоты в геометрии канала может быть записано в виде уравнения (10.1):

$$\frac{\partial C_{\text{БК}}}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial (Av_{\text{ТН}} C_{\text{БК}})}{\partial x} = 0 \quad (10.1)$$

где $C_{\text{БК}}$ – концентрация БК, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

A – суммарная площадь в активной зоне, занятая теплоносителем;

m^2 , $v_{\text{ТН}}$ – скорость движения теплоносителя, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Площадь, занятую теплоносителем в активной зоне, определим как (10.2):

$$A = S_{\text{АЗ}} - S_{\text{Топ}} - S_{\text{Тех}} \quad (10.2)$$

где $S_{\text{АЗ}}$ – площадь активной зоны;

m^2 , $S_{\text{Топ}}$ – площадь, занятая топливными элементами;

m^2 , $S_{\text{Тех}}$ – площадь, занятая технологическими каналами, m^2 .

Скорость движения теплоносителя определяется через массовый расход теплоносителя $G_{\text{ТН}}$ как (10.3):

$$v_{\text{ТН}} = \frac{G_{\text{ТН}}}{A\gamma_{\text{ТН}}} \quad (10.3)$$

Интегрируя обе части уравнения (10.1) по длине канала L (L равно высоте активной зоны), получаем (10.4):

$$\int_0^L \frac{\partial C_{\text{БК}}}{\partial t} dx + \int_0^L \left(\frac{1}{A} \frac{\partial (Av_{\text{ТН}} C_{\text{БК}})}{\partial x} \right) dx = 0 \quad (10.4)$$

Перепишем (10.4), принимая, что концентрация борной кислоты распределена равномерно:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^L C_{\text{БК}} dx + \frac{1}{A} \int_0^L \left(\frac{\partial (Av_{\text{ТН}} C_{\text{БК}})}{\partial x} \right) dx = 0 \quad (10.5)$$

Откуда беря граничными условиями $C_{\text{БК}}(x=0) = C_{\text{БК}}^{\text{Вх}}$ и $C_{\text{БК}}(x=L) = C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}$, получаем следующее дифференциальное уравнение (11.1):

$$\frac{dC_{\text{БК}}(t)}{dt} = -\frac{G_{\text{ТН}}}{LA\gamma_{\text{ТН}}} (C_{\text{БК}}^{\text{Вх}} - C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}) \quad (11.1)$$

Также используя идею о том, что концентрация борной кислоты распределяется равномерно, можно положить, что $C_{\text{БК}}$ в самом узле может быть определена через входное и выходное значения борной кислоты из этого узла как (11.2):

$$C_{\text{БК}} = \frac{C_{\text{БК}}^{\text{Вх}} + C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}}{2} \rightarrow C_{\text{БК}}^{\text{Вых}} = 2C_{\text{БК}} - C_{\text{БК}}^{\text{Вх}} \quad (11.2)$$

Тогда итоговое уравнение можно переписать (11.3):

$$\frac{dC_{\text{БК}}(t)}{dt} = -\frac{2G_{\text{ТН}}}{LA\gamma_{\text{ТН}}} (C_{\text{БК}} - C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}) \quad (11.3)$$

Однако, такое допущение будет приводить к нефизическому поведению: резкое изменение $C_{\text{БК}}^{\text{Вх}}$ вызовет столь же резкое изменение $C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}$, но с противоположным знаком, поэтому в данной работе предлагается подход «two well-stirred tanks in series», используе-

мый в теплогидравлической модели Р. Манна [13, 14]: выходная концентрация из первого узла борной кислоты равна средней концентрации борной кислоты в самом узле $C_{\text{БК}}^{\text{Вых}} = C_{\text{БК}}$, а также выступает в роли входной концентрации в следующей узел. Для двух последовательных узлов модель может быть записана в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (12):

$$\begin{cases} \frac{dC_{\text{БК1}}(t)}{dt} = -\frac{G_{\text{ТН}}}{\frac{L}{2}A\gamma_{\text{ТН}}} (C_{\text{БК1}} - C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}) \\ \frac{dC_{\text{БК2}}(t)}{dt} = -\frac{G_{\text{ТН}}}{\frac{L}{2}A\gamma_{\text{ТН}}} (C_{\text{БК2}} - C_{\text{БК1}}) \end{cases} \quad (12)$$

Реакция моделей (11.3) и (12) на изменение концентрации борной кислоты в реакторе с 5.39 до 5.55 г/кг представлена на рисунке (7).

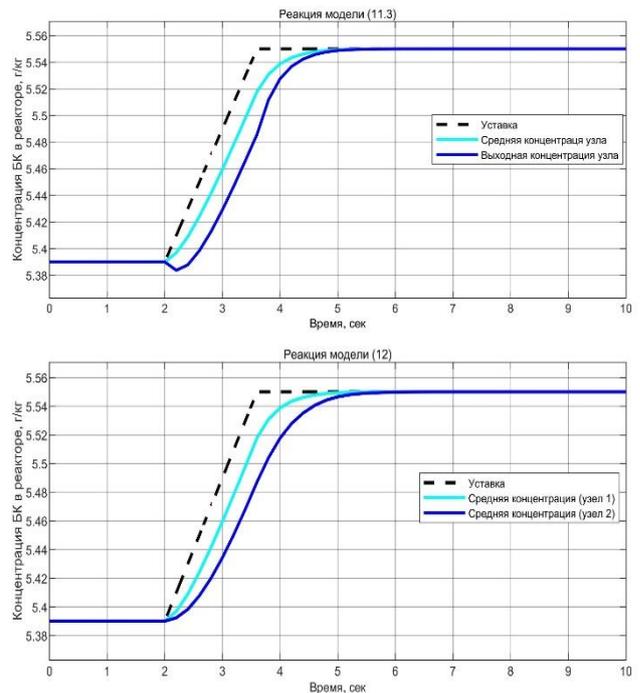


Рисунок 7. Сравнение подходов (11.3) и (12)
Figure 7. Comparison of the approaches (11.3) and (12)

Очевидно, что i -ый узел борной кислоты примыкает к i -ому узлу теплоносителя, и связан с ним через массовый расход. Соответствующий эффект реактивности в случае подхода «two well-stirred tanks in series» для двух узлов может быть записан в виде выражения (13):

$$\rho_{\text{БК}}(t) = \frac{\alpha_{\text{БК}}}{2} (C_{\text{БК}1}(t) - C_{\text{БК}1_0}) + \frac{\alpha_{\text{БК}}}{2} (C_{\text{БК}2}(t) - C_{\text{БК}2_0}) \quad (13)$$

Хафез Н. и соавторы в своей работе [36] показали, что эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{\text{эф}}$ в случае изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура реактора ВВЭР-1200 аппроксимируется следующей зависимостью (14):

$$K_{\text{эф}} = -0.1741C_{\text{БК}}(t) + 0.136 \quad (14)$$

Это позволяет численно оценить коэффициент реактивности по борной кислоте на основании расчетов по формуле (15) [36]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh(t)}{dt} = G_r h_0 (1 + \text{sign}(h)) \\ \frac{d\rho_1^{av}(t)}{dt} = G_r \rho_1^{tot} \left(1 + \text{sign} \left(h - \frac{(i-1)h_0}{i} \right) \right) \\ \frac{d\rho_2^{av}(t)}{dt} = G_r (\rho_2^{tot} - \rho_1^{tot}) \left(1 - \text{sign} \left(h - \frac{(i-1)h_0}{i} \right) \right) \left(1 + \text{sign} \left(h - \frac{(i-2)h_0}{i} \right) \right) \\ \vdots \\ \frac{d\rho_i^{av}(t)}{dt} = G_r (\rho_i^{tot} - \rho_{i-1}^{tot}) \left(1 - \text{sign} \left(h - \frac{h_0}{i} \right) \right) (1 + \text{sign}(h)) \end{array} \right. \quad (16)$$

где h – текущее положение 12 группы ОР СУЗ (мм);

h_0 – высота активной зоны реактора ВВЭР-1200;

G_r – скорость перемещения ОР СУЗ (в долях высоты активной зоны в сек);

$\rho_1^{av}, \rho_2^{av} \dots \rho_j^{av}$ – средняя вносимая реактивность 12 группой ОР СУЗ в 1, 2, ... j узлы, соответственно.

Значения реактивностей, внесенных в систему путем перемещения ОР СУЗ ρ_i^{tot} , полученные на основе экспериментальных данных взяты также из работы [16]. Для удобства моделирования и выводов графика в одном окне все моделируемые величины (мощность, аксиальный офсет, АХОИ, выходящая температура теплоносителя, оптимальный офсет и допустимые границы оф-

$$\alpha_{\text{БК}} \approx -\frac{1741}{i} \times 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{г}} \quad (15)$$

В формуле (15) введена поправка на число использованных узлов i .

Результаты моделирования, обработка результатов и выводы

Нелинейная верифицированная модель 12 группы ОР СУЗ, которая воздействует на аксиальные узлы последовательно при вводе, получена в ранее опубликованной работе автора [16] и в общем случае может быть представлена в виде выражений (16):

сета) приведены в относительном виде формулы (17):

$$\overline{X(t)} = \frac{X(t) - X_0}{X_0} \quad (17)$$

где $X(t)$ – текущее значение моделируемого параметра;

X_0 – начальное значение моделируемого параметра.

Моделирование проводилось в два этапа: в эксперименте №1 изменялось положение 12 группы ОР СУЗ (рис. 8.1), но при этом концентрация борной кислоты не изменялась. В эксперименте №2 (рис. 8.2) изменялась концентрация борной кислоты через реактор, положение 12 группы ОР СУЗ оставалось неизменным. Важно учесть, что полученные модели являются нелинейными и относятся к классу «жестких» систем, по-

этому схема численного дифференцирования должна быть адаптирована к такому классу задач. В данной работе используется схема

численного дифференцирования вариативно-го шага и вариативного порядка (Variable Step Variable Order, VSVO) ode15s.

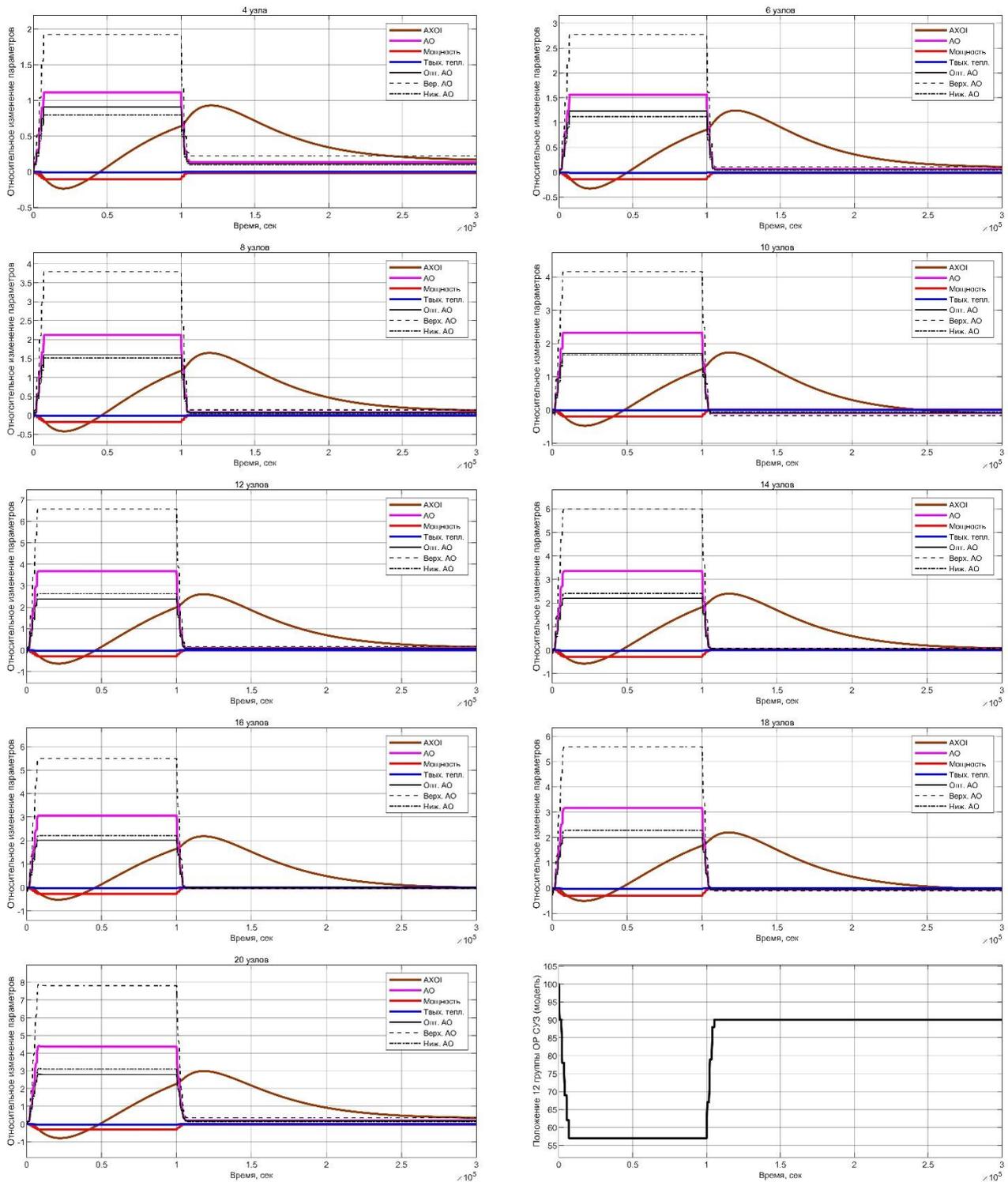


Рисунок 8.1. Переходные процессы при изменении положения модели (16) 12 группы ОР СУЗ
Figure 8.1. Transient processes while inserting and withdrawal of the model (16) of the group 12 of the CPS CR

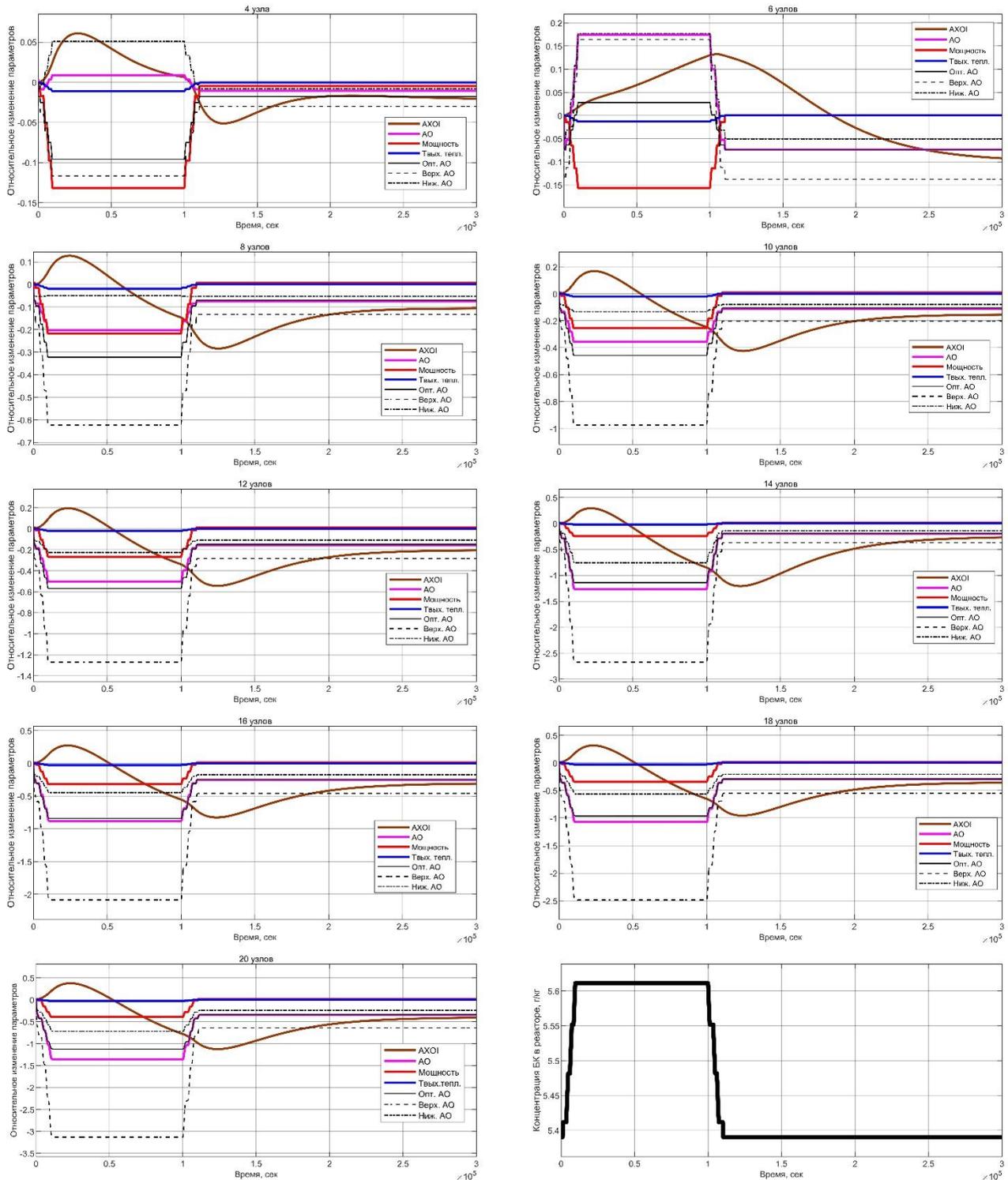


Рисунок 8.2. Переходные процессы при изменении концентрации модели (12) борной кислоты в реакторе
Figure 8.2. Transient processes while changing concentration of the model (12) of the boric acid in reactor

Адекватность предложенных моделей оценивалась по метрикам MAE (Mean Absolute Error) и RMSE (Root Mean Squared Error) для значений мощности, аксиального офсета и выходной температуры теплоносителя, которые определяются по формулам (18.1) и (18.2), соответственно:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{\text{мод}} - y_{\text{экс}}| \quad (18.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{мод}} - y_{\text{экс}})^2} \quad (18.2)$$

где $n = 5$ – число точек измерений;

$U_{\text{мод}}$ – результаты модели;

$U_{\text{эксп}}$ – результаты эксперимента с многофункционального тренажера.

Использование двух метрик обосновывается следующим: MAE менее чувствительна к выбросам, что делает её предпочтительной, когда данные содержат аномальные значения, которые не должны сильно влиять на общую оценку модели, в то время как RMSE штрафует за большие ошибки сильнее, чем MAE, поскольку ошибки возводятся в квадрат. Это делает RMSE предпочтительной метрикой, когда большие отклонения от предсказанных значений недопустимы и должны иметь значительное влияние на оценку модели. Полученные результаты приведены на рисунке 9.

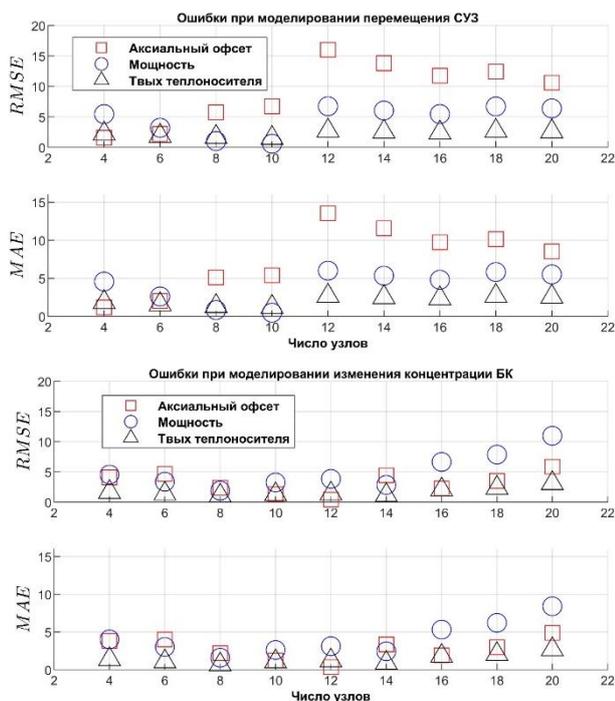


Рисунок 9. Статистическая обработка результатов моделирования

Figure 9. Statistical processing of the simulation results

Исходя из рисунков 8.1, 8.2 и 9 важно обратить внимание на следующие моменты:

1. При моделировании изменения положения 12 группы ОР СУЗ в целом все модели ведут себя удовлетворительно. Однако, при увеличении числа аксиальных узлов (более 10) все сильнее проявляют себя коэффициенты связи, определенные в рамках диффузионного подхода Эйвери при одновременном уменьшении влияния механизма

обратной связи. Возможно, что более точные переходные процессы могли бы быть достигнуты при использовании формализма Кобаяши;

2. При моделировании изменения концентрации борного поглотителя в реакторе 4 и 6 узловых модели показали неудовлетворительные результаты, хотя и с небольшими значениями MAE и RMSE: вместо наблюдения увеличения аксиального офсета наблюдается его уменьшение, что не согласуется с экспериментальными данными;

3. Значения офсета близкие к оптимальным (9) были получены при изменении концентрации борной кислоты, что в целом согласуется с экспериментальными данными;

4. Для MAE и RMSE были установлены пределы в 5% для минимизации расхождения между результатами моделирования и экспериментом. Исходя из графиков (8.1), (8.2) и (9), компромиссным подходом при наличии двух управляющих воздействий является 6 или 8-узловая модели, что значительно расширяет результаты при использовании двух- и четырехточечного подходов, использованных в работах [17–25].

Несмотря на принятый в рамках теории связанных реакторных систем упрощенный точечный подход, модель показывает удовлетворительный результат в рамках представленных возмущений. Благодаря простоте и низкой размерности эта модель полезна для моделирования переходных процессов, связанных с задачей управления технологическими параметрами, а также может быть положена в основу для проектирования современных регуляторов управления не только интегральной мощности РУ, но и формы распределения этой мощности (АО, АХОИ) по объему активной зоны. Таким регуляторам, например, может быть выбран нечеткий пропорционально – интегральный регулятор (Fuzzy-PI), хорошо проявивший себя в режиме следования за нагрузкой, а также в режиме астатического поддержания мощности при моделировании нуль-мерной модели динамики реактора ВВЭР-1200 [37]. В качестве ограничений данной модели следует отметить, что практически все параметры, входящие в конечную систему, являются константами, что позволяет произвести

дальнейшую линеаризацию около равновесных состояний (LTI, Linear Time Invariant) и получить передаточные функции по заданным каналам. Однако для более сложных случаев, таких как линейные модели с переменными параметрами (LPV, Linear Parameter Varying) необходимо предусмотреть функциональные зависимости от мощности таких параметров как $K_{\text{тепл}}$, $G_{\text{ТН}}$ и $m_{\text{ТН}}$, что было выполнено для типовой РУ PWR в работе [38]. Также не был рассмотрен случай

моделирования поведения данной модели на конец топливной кампании.

Все экспериментальные данные, а также скрипты MATLAB могут быть переданы по запросу.

Автор выражает благодарность начальнику отдела тренажерного обучения АНО ДПО «Техническая академия Росатома» В.В. Ледяеву за помощь в проведении работ на тренажере, а также ценным комментариям рецензентов, позволившим улучшить данную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Gritsevskiy A. Outlook for global nuclear power: energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. 11 International Conference of the Croatian Nuclear Society, 5-8 Jun 2016, Zadar (Croatia), p. 20. Available at: <https://inis.iaea.org/records/bp7ha-ykh69> (accessed: 01.09.2024).
2. Zhou G., Tan D. Review of nuclear power plant control research: neural network-based methods. *Annals of nuclear energy*. 2023;181:109513 <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109513>
3. Соловьев Д.А., Хачатрян А.Г., Чернов Е.В., Аль Малкави Р.Т. Исследование алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2022;2:37–48. <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.04>
4. Soloviev D.A., Khachatryan A.G., Chernov E.V., Al Malkawi R.T. Investigation of algorithms for suppressing xenon oscillations in a VVER-1200 reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2022;2:37–48. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.04>
4. Dong Z., Cheng Z., Zhu Y., Huang X., Dong Y., Zhang Z. Review on the recent progress in nuclear plant dynamical modeling and control. *Energies*. 2023;16(3):1443. <https://doi.org/10.3390/en16031443>
5. Пикина Г.А., Ле В.Д., Пашченко Ф.Ф. Модели динамики реактора ВВЭР с мощностным коэффициентом реактивности. *Вестник МЭИ*. 2016;2:75–83. EDN: TRYICK. Режим доступа: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/65> (дата обращения 15.07.2024).
6. Pikina G.A. Le V.D., Pashchenko F. F. Modeli dinamiki reaktora VVER s moshchnostnym koeffitsiyentom reaktivnosti. *Vestnik MEI*. 2016;2:75–83. (in Russ.). EDN: TRYICK. Available at: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/65> (accessed: 15.07.2024).
6. Curtain R., Morris K. Transfer functions of distributed parameter systems: a tutorial. *Automatica*. 2009;45(5):1101–1116. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.01.008>
7. Bridges D.N., Clement J.D. An investigation of space-dependent reactor transfer functions with temperature feedback. *Nuclear science and engineering*. 1972;47(4):421–434. <https://doi.org/10.13182/NSE72-A22434>
8. Shimjith S.R., Tiwari A.P., Naskar M., Bandyopadhyay B. Space-time kinetics modeling of Advanced Heavy Water Reactor for control studies. *Annals of nuclear energy*. 2010;37:310–324 <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.12.011>
9. Wang P.F., Liu Y., Jiang B.T., Wan J.S., Zhao F.Y. Nodal dynamics modeling of AP1000 reactor for control system design and simulation. *Annals of nuclear energy*. 2013;62:208–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2013.05.036>
10. Dong Z., Huang X., Zhang L. A nodal dynamic model for control system design and simulation of an MHTGR core. *Nuclear engineering and design*. 2010;240(5):1251–261. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.032>
11. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K. Multi-nodal PWR reactor model – methodology proposition for power distribution coefficients calculation. 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) 29.08.2016–01.09.2016. Miedzyzdroje, Poland. 2016:385–390. <https://doi.org/10.1109/MMAR.2016.7575166>
12. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K. Nodal models of pressurized water reactor core for control purposes – a comparison study. *Nuclear engineering and design*. 2017;322:444–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.005>
13. Ball S J. Approximate model for distributed-parameter heat-transfer systems. Jan. 1963. Available at: <https://www.osti.gov/biblio/4651013> (accessed: 01.11.2024).
14. Правосуд С.С., Маслаков Д. С., Якубов Я.О., Овчеренко А.А. Верификация модели динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящей из одного топливного узла, примыкающего к двум узлам теплоносителя. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;48(3):82–95. EDN: YBZMTK. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>

Pravosud S.S., Maslakov D.S., Yakubov Ya.O., Ovcherenko A.A. Verification of the WWER-1200 reactor dynamic model consisting of one-fuel unit adjacent to two coolant units. *Global nuclear safety*. 2023;48(3):82–95. (In Russ.). EDN: YBZMTK. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>.

15. Juslin K., Paljakka M. Apros – a multifunctional modelling environment. 1999. Available at: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20122527> (accessed: 17.09.2024).

16. Правосуд С.С., Якубов Я.О., Сусакин В.А. Многоточечная модель кинетики с мощностным эффектом реактивности для контроля аксиального оффсета реактора ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):73–90. EDN: LQRKEU <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

Pravosud S.S., Yakubov Ya.O., Susakin V.A. Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode of operation. *Global nuclear safety*. 2024;(2):73–90. (In Russ.). EDN: LQRKEU. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

17. Mousakazemi S.M.H. Control of a pressurized light-water nuclear reactor two-point kinetics model with the performance index-oriented PSO. *Nuclear engineering and technology*. 2021;53(8):2556–2563. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.018>

18. Aftab A., Luan X. A Takagi Sugeno based reactor power control of VVER-1000 using linear parameter varying identification of two-point kinetic model. *Progress in nuclear energy*. 2021;140:103905. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103905>

19. Eliasi H., Menhaj M.B., Davilu H. Robust nonlinear model predictive control for nuclear power plants in load following operations with bounded xenon oscillations. *Nuclear engineering and design*. 2011;241(2):533–543. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.12.004>

20. Rafiei M., Ansarifar G.R., Hadad K., Mohammadi M. Load-following control of a nuclear reactor using optimized FOPID controller based on the two-point fractional neutron kinetics model considering reactivity feedback effects. *Progress in nuclear energy*. 2021;141:103936. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103936>

21. Abdulraheem K. et al. Adaptive second order sliding mode control for a pressurized water nuclear reactor in load following operation with Xenon oscillation suppression. *Nuclear engineering and design*. 2022;391:111742. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111742>

22. Zaidabadi nejad M., Ansarifar G.R. Adaptive robust control for axial offset in the P.W.R nuclear reactors based on the multipoint reactor model during load-following operation. *Annals of nuclear energy*. 2017;103:251–264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.01.025>

23. Zaidabadi nejad M., Ansarifar G.R. Estimation of axial xenon oscillations with online parameter adaptation in the P.W.R nuclear reactors using Lyapunov approach based on the multipoint kinetics reactor model. *Annals of nuclear energy*. 2017;108:277–300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.04.028>

24. Aftab A., Luan X., Anjum M.S. Design of multi-module adaptive fuzzy power tracking control for nonlinear four-point reactor core model under multiple transient conditions. *Progress in nuclear energy*. 2022;149:104248. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104248>

25. Zarei M. A multi-point kinetics-based MIMO-PI control of power in PWR reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2018;328:283–291. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.01.011>

26. Zarei M. Closed loop configuration in the axial flux tilt control of a PWR. *Annals of nuclear energy*. 2019;134:47–53. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.05.059>

27. Avery R. Theory of coupled reactors. In: Proc. 2nd UN Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, United Nations, 1958;. Vol. 2. P. 182. <https://doi.org/10.2172/4315469>

28. Belleni-Morante A. The kinetic behaviour of a reactor composed of G loosely coupled cores: Integral formulation. *Journal of nuclear energy. Parts A/B. Reactor science and technology*. 1964;18(10):547–559. [https://doi.org/10.1016/0368-3230\(64\)90139-9](https://doi.org/10.1016/0368-3230(64)90139-9)

29. Komata M. On the derivation of Avery's coupled reactor kinetics equations. *Nuclear science and engineering*. 1969;38(3):193–204. <https://doi.org/10.13182/nse69-a21154>

30. Kobayashi K. Rigorous derivation of multi-point reactor kinetics equations with explicit dependence on perturbation. *Journal of nuclear science and technology*. 1992;29(2):110–120. <https://doi.org/10.1080/18811248.1992.9731503>

31. Valocchi G., Tommasi J., Ravetto P. Reduced order models in reactor kinetics: A comparison between point kinetics and multipoint kinetics. *Annals of nuclear energy*. 2020;147:107702. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107702>

32. Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф. Методы расчета связанных реакторных систем. *Атомная энергия*. 2004;97(6):403–414. EDN PEUJFB. Available at: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3399> (дата обращения: 22.09.2024).

Gulevich A.V., Kuharchuk O.F. Metody rascheta svyazannyh reaktornyh system. *Atomnaya energiya*. 2004;97(6):403–414. (in Russ.). EDN: PEUJFB. Available at: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3399> (accessed: 22.09.2024).

33. Skinner R.E., Cohen E.R. Reduced delayed neutron group representations. *Nuclear science and engineering*, 1959(2017);5(5):291–298. <https://doi.org/10.13182/NSE59-A25601>

34. Джарум Б., Соловьёв Д.А., Семенов А.А., Щукин Н.В., Выговский С.Б., Аль-Шамайлах А.И., Танаш Х.А. Влияние температурного регулирования при работе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой. *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2020;9(3):201–209. Режим доступа: <https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/84> (дата обращения: 01.11.2024).

Djaroum B., Solovyev D.A., Semenov A.A., Schukin N.V., Vygovsky S.B., Al-Shamayleh A.I., Tanash H.A. Temperature regulation contribution during the power control of the VVER-1000 and VVER-1200 reactors in a load-following mode. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2020;9(3):201–209. (In Russ.). Available at: <https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/84> (accessed: 01.11.2024).

35. Yu H., Wang M., Cai R., Zhang D., Tian W., Qiu S., Su G.H. Development and validation of boron diffusion model in nuclear reactor core subchannel analysis. *Annals of nuclear energy*. 2019;130:208–217. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.02.046>

36. Hafez N., Shahbunder H., Amin E., Elfiki S.A., Abdel-Latif A. Study on criticality and reactivity coefficients of VVER-1200 reactor. *Progress in nuclear energy*. 2021;131:103594 <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103594>

37. Правосуд С.С., Маслаков Д.С., Якубов Я.О. Применение нечетких регуляторов для управления мощностью ядерного реактора ВВЭР-1200. *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2024;13(2):97–109. EDN: QBFVFE. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2024.320>

Pravosud S., Maslakov D., Yakubov Ya. An application of fuzzy logic controllers for power control of the VVER-1200 nuclear reactor. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2024;13(2):97–109. (In Russ.). EDN: QBFVFE. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2024.320>

38. Ramaswamy P., Edwards R.M., Lee K.Y. An automatic tuning method of a fuzzy logic controller for nuclear reactors. *IEEE Transactions on nuclear science*. 1993;40(4):1253–1262. <https://doi.org/10.1109/TNS.1993.8526778>

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 АВТОРЕ:

Сергей Сергеевич Правосуд, ведущий инженер по подготовке персонала учебно-методического центра «Ядерная и радиационная безопасность» АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл.; старший преподаватель кафедры «Электроника и автоматика физических установок» СТИ НИЯУ «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-3225-4748>

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru,

SSPravosud@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Sergei S. Pravosud, Leading engineer for personnel training of the Educational and Methodological Centre of Nuclear and Radiation Safety at Rosatom Technical Academy, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation; Senior lecturer of the Department of Electronics and Automatics of Physical Facilities, Seversk Technological Institute the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-3225-4748>

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru,

SSPravosud@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 09.01.2025

После доработки / Revision 10.03.2025

Принята к публикации / Accepted 13.03.2025

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-06>

EDN TMALXU

Оригинальная статья / Original paper



Управление старением динамически нагруженных трубопроводов

С.Б. Кравец¹  , М.М. Костикова¹, С.А. Кузин²  , А.Ю. Смолин² , А.Е. Дембицкий²

¹ ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»,
г. Москва, Российская Федерация

 kravets_sb@mail.ru

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

 VITIkafAE@mephi.ru

Аннотация. В РФ требования к управлению старением (ресурсом) трубопроводов, отнесенных в проектах блоков атомных станций (далее – АС) в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии к элементам 1, 2 и 3 классов безопасности, установлены в НП-096-15. Для динамически нагруженных трубопроводов АС одним из наиболее «опасных» нагружающих факторов являются именно вибрационные нагрузки, так как для реальных конструкций трубопроводов АС значения коррозионно-эрозионного износа не велики вследствие применения коррозионно-стойких сталей и ограничения скорости протекающей среды (согласно НП-068-05 скорость воды – до 5 м/с, а пара и газа – до 60 м/с). Рассмотрены вопросы управления старением динамически нагруженных трубопроводов. Предложено использование расчетно-экспериментального метода для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода при вибрационном воздействии с целью определения повреждаемости при циклически повторяющихся нагрузках. Рекомендовано в качестве ресурсной характеристики при вибрационном нагружении трубопровода использовать не нормируемые частоты или амплитуды колебаний, а значения накопленных и предельных повреждений.

Ключевые слова: паропроводы, трубопроводы АС, вибронпряжения, виброперемещения, эксплуатационные режимы, расчетная температура, допускаемая амплитуда напряжений.

Для цитирования: Кравец С.Б., Костикова М.М., Кузин С.А., Смолин А.Ю., Дембицкий А.Е. Управление старением динамически нагруженных трубопроводов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1): 60–66. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>

For citation: Kravets S.B., Kostikova M.M., Kuzin S.A., Smolin A.Y., Dembitskiy A.E. Aging management of dynamically loaded pipelines. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):60–66. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-06>

Aging management of dynamically loaded pipelines

Sergey B. Kravets¹  , Marina M. Kostikova¹, Sergey A. Kuzin²  ,
Alexander Y. Smolin² , Artyom E. Dembitskiy²

¹ Scientific and Technical Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Moscow, Russian Federation
 kravets_sb@mail.ru

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

 VITIkafAE@mephi.ru

Abstract. In the Russian Federation the requirements for aging (life) management of pipelines which in the designs of nuclear power plant (hereinafter - NPP) units in accordance with the federal norms and rules in the field of nuclear energy use to the elements of 1, 2 and 3 safety classes, are established in NP-096-15. One of the most “dangerous” loading factors for dynamically loaded pipelines of NPPs is vibration loads as for real structures of NPP pipelines the values of corrosion-erosion wear are not high due to the use of corrosion-resistant steels and limitation of the flowing medium velocity (according to NP-068-05 water velocity is up to 5 m/s, and steam and gas is up to 60 m/s). The issues of aging management of dynamically loaded pipelines are considered. The use of calculation-experimental

method is proposed to determine the stress-strain state of the pipeline under vibration impact in order to determine the damageability under cyclically repeated loads. It is recommended to use the values of accumulated and ultimate damage rather than standardized frequencies or vibration amplitudes as a resource characteristic under vibration loading of the pipeline.

Keywords: steam pipelines, NPP pipelines, vibration stresses, vibration displacements, operating modes, design temperature, allowable stress amplitude.

В РФ требования к управлению старением (ресурсом) трубопроводов, отнесенных в проектах блоков атомных станций (далее – АС) в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии к элементам 1, 2 и 3 классов безопасности, установлены в НП-096-15¹. Согласно данного нормативного документа управление ресурсом предусматривает:

- соблюдение требований нормативной документации;
- поддержание трубопроводов АС в работоспособном состоянии путем своевременного выявления повреждений, осуществления текущих ремонтов, замены выработавших ресурс элементов (участков);
- установление механизмов образования и развития дефектов, способных привести к деградации трубопроводов АС;
- выявление определяющих механизмов старения, деградации и повреждений трубопроводов АС;
- проведение мониторинга процессов старения и деградации, контроля технического состояния и оценки выработанного (остаточного) ресурса трубопроводов АС;
- ослабление процессов старения и деградации и трубопроводов посредством ремонта и модернизации, применения щадящих режимов эксплуатации.

В качестве ресурсных характеристик трубопроводов АС, согласно РБ-132-17² выступают: общая и локальная толщины стенок;

¹ НП-096-15. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения, 2015. – Режим доступа: https://docs.secncrs.ru/catalog/FNP/NP_096_15/ (дата обращения: 18.11.2024).

² РБ-132-17. Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик работающих под давлением оборудования и трубопроводов атомных станций, – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document456098885> (дата обращения: 18.11.2024).

накопленное значение повреждения металла при циклически повторяющихся нагрузках; сдвиг критической температуры хрупкости металла вследствие температурного старения и циклической повреждаемости металла; вибрационные характеристики трубопровода и т.д. Таким образом, согласно РБ-132-17 усталостное повреждение металла при циклически повторяющихся нагрузках, характеризующееся предельным значением, определенным в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии, не учитывает циклические нагрузки от вибрации. В РБ-132-17 критериями оценки ресурса для вибрационных характеристик трубопровода служат недопустимые частоты или амплитуды колебаний, приводящие к нарушениям условий прочности. По нашему мнению, для динамически нагруженных трубопроводов целесообразно не выделять в качестве ресурсной характеристики вибрационные параметры трубопровода, а рассматривать их в качестве одного из проектных режимов при оценке накопленного значения повреждения металла при циклически повторяющихся нагрузках.

Следует отметить, что для динамически нагруженных трубопроводов АС одним из наиболее «опасных» нагружающих факторов являются именно вибрационные нагрузки, так как для реальных конструкций трубопроводов АС значения коррозионно-эрозионного износа не велики вследствие применения коррозионноустойчивых сталей и ограничения скорости протекающей среды (согласно НП-068-05³ скорость воды – до 5 м/с, а пара и газа – до 60 м/с).

³ НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2005. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200044037> (дата обращения: 18.11.2024).

Как показывает практика, при использовании в качестве ресурсной характеристики накопленного значения повреждения металла при циклически повторяющихся нагрузках, оценка выработанного и остаточного ресурса трубопроводов для расчетных режимов, за исключением вибрационного нагружения, не представляет большой сложности, так как на этапе проектирования нагружающие факторы определяются достаточно точно.

Наиболее перспективным направлением определения накопленных повреждений трубопроводов при вибрационных нагрузках в настоящее время является расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов при эксплуатационных нагрузках, в том числе и вибрационных. При этом в ходе выполнения данного расчетно-экспериментального исследования учитываются факторы, которые не могут быть точно определены на стадии проектирования, а именно:

- собственные частоты трубопроводной системы, вследствие неопределенности исходных данных, связанных с жесткостью опорных конструкций, фактической толщины трубы и т.д.;

- реальные значения параметров демпфирования.

Кроме того, экспериментальные данные о собственных частотах и формах колебаний трубопровода позволяют выполнить верификацию его расчетной схемы и учесть фактическое влияние, как масс среды и теплоизоляции, так и жесткости трубопровода и опорных конструкций.

Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубопровода при вибрационном воздействии предлагается проводить в следующем порядке.

Принимая во внимание, что места опирания многопролетного трубопровода наиболее корректно моделируются шарнирами, а максимальные значения номинальных изгибных напряжений возникают в месте заделки, то в качестве расчетной схемы для оценки вибрационного воздействия допускается

применить схему, приведенную на рисунке 1.

Для реальных условий частотные характеристики вибрационного воздействия играют важную роль, так как именно низкочастотные колебания обладают наибольшей механической энергией. Зависимость уровня механических воздействий среды на стенки трубопровода от вынужденной частоты воздействия, обусловленной гидродинамическими силами турбулентного потока, рассмотренная в НП-068-05, приведена на рисунке 1.

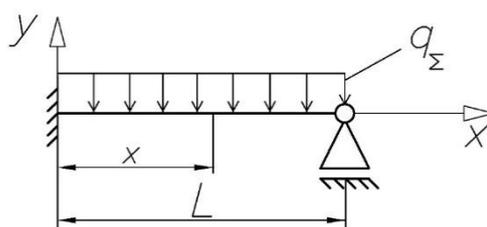


Рисунок 1. Расчетная схема участка трубопровода
Figure 1. Calculation diagram of the pipeline section

На первой стадии выполнения расчета для построения «теоретической» расчетной модели в расчетной программе, использующей метод конечных элементов (МКЭ), необходимо ввести исходные данные: геометрические параметры (длина участка трубопровода и характеристики его поперечного сечения); весовые параметры (плотность материала трубы, присоединенные массы теплоизоляции и рабочей среды, учитываемые пересчетом плотности материала трубопровода); условия закрепления. Далее в данной программе следует для разработанной модели выполнить расчеты первых (низших) пяти собственных частот и форм колебаний данной модели.

Следующим этапом является проведение экспериментальных исследований вибрационного состояния трубопровода, в ходе которых следует определить не только значения виброскорости, но и реальные значения частот и форм собственных колебаний, параметров демпфирования.

На третьем этапе необходимо выполнить доводку «теоретической» расчетной модели до «реальной», используя в качестве критерия

рия соответствия моделей значений низших собственных частот колебаний трубопроводных систем, которые наиболее точно характеризует жесткость конструкции. При доводке «теоретической» расчетной модели, как правило, следует уточнить фактические толщины трубопроводов, условия опирания (жесткость опорной конструкции, усилия затяга анкерных болтов и т.д.).

Следует отметить, что при использовании данного метода, отпадает необходимость определения точки максимального прогиба трубопровода соответствующего конкретной форме колебаний, в которой обычно устанавливается датчик контроля виброскорости.

Для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода при вибрационном нагружении, следует для «реальной» расчетной модели использовать экспериментальные определенные значения виброскорости. При этом значения виброперемещений для гармонических колебаний можно определить по формуле (1):

$$S = (450 \times v_{\max})/f, \quad (1)$$

где S – виброперемещение, мкм;

v_{\max} – максимальное значение виброскорости, мм/с;

f – частота, Гц.

Расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода с использованием «реальной» расчетной модели может быть выполнен линейно-спектральным или динамическим методами, предусмотренными в программах, аттестованных на выполнение расчетов динамики и прочности конструкций МКЭ. При этом в программе, использующей МКЭ, необходимо также создать расчетные модели патрубковых зон (тройниковых узлов), отражающие их реальные размеры для определения коэффициентов концентрации и определения амплитуд условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений.

Определение циклической прочности, а также оценку выработанного и остаточного ресурса трубопроводов при воздействии вибрационных нагрузок, следует проводить в соответствии с требованиями ГОСТ Р

59115.9-2021⁴ и рекомендациям [1–2]. Данная оценка ресурса не будет иметь излишний консерватизм, так как в процессе расчета будут использованы расчетные модели, жесткостные характеристики которых подтверждены экспериментально.

Практическую реализацию данного подхода покажем на конкретном примере. В качестве расчетной схемы примем схему, приведенную на рисунке 1 с длиной пролета $L = 5,5$ м для трубопровода, изготовленного из стали 08X18H10T с размерами ($D_{\text{нар}} = 108$ мм, $D_{\text{внутр}} = 102$ мм). Масса данного пролета с учетом теплоизоляции и заполненной жидкости (вода) составила 121,0 кг. В результате выполненных расчетно-экспериментальных обоснований было установлено, что значение первой (низшей) собственной частоты колебаний для данного расчетного случая составит 9,8 Гц.

В качестве нагружающего фактора выберем вибрационное воздействие с максимальным значением виброскорости $v_{\max} = 15$ мм/с, так как согласно ГОСТ Р 59115.11-2021 «Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок»⁹ поверочный расчет на постпроектных стадиях при максимальном измеренном значении $v_{\max} = 15$ мм/с проведение расчетов на вибропрочность трубопроводов с рабочей средой не требуется. По результатам расчетов значение виброперемещений для $v_{\max} = 15$ мм/с составило 0,69 мм.

Выполним расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода с использованием «реальной» расчетной модели методом динамического анализа,

⁴ ГОСТ Р 59115.9. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2022. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200182238?ysclid=m87a1aquiz316550711> (дата обращения: 18.12.2024).

⁵ ГОСТ Р 59115.11-2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200181284?ysclid=m85zirqm61737337876> (дата обращения: 18.12.2024).

реализованного в программе «Зенит-95»⁶. Результаты оценки напряженно-деформированного состояния патрубковой зоны для виброскорости $v_{\max}=15$ мм/с приведены на рисунке 2, при этом в качестве нагружающего фактора использовались только усилия от вибрации (весовые нагруз-

ки были исключены). Как видно из графического отображения напряженно-деформированного состояния патрубковой зоны, максимальное значение местных напряжений (интенсивность напряжений) составило (σ_{aF}) = 7,6 МПа.

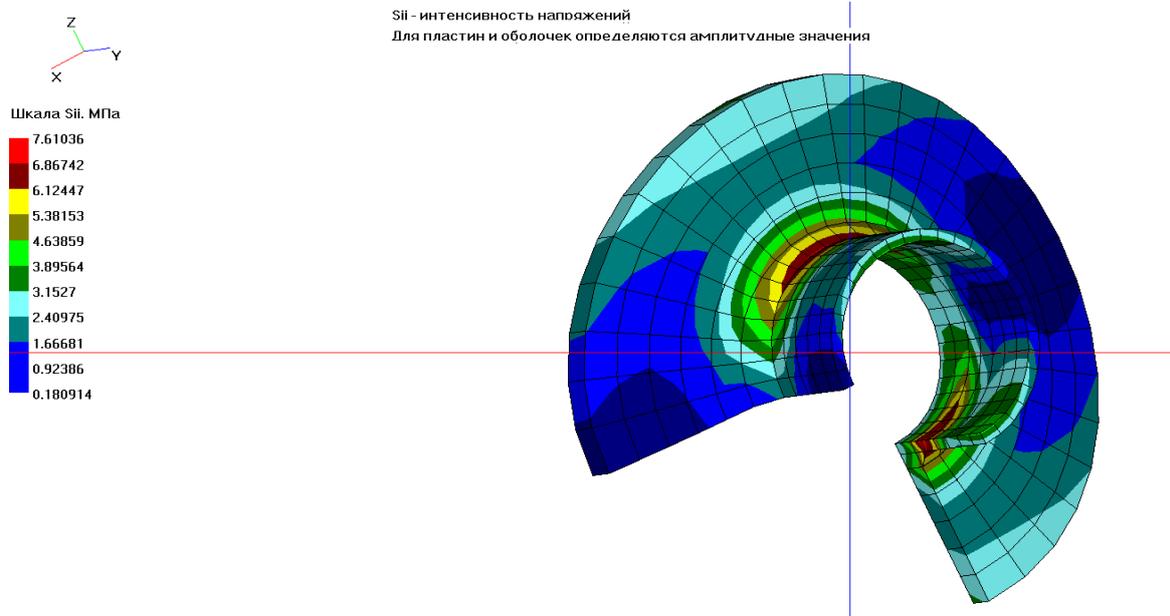


Рисунок 2. Напряжения от вибрации (без учета других факторов)
Figure 2. Vibration stresses (excluding other factors)

Выполним оценку циклической прочности согласно ГОСТ Р 59115.9-2021. Допускаемая амплитуда условного упругого напряжения или допускаемое число циклов при $[N_0] \leq 10^{12}$ (без определения коэффициента асимметрии):

$$\left. \begin{aligned} [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{(4n_N [N_0])^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T_{\min}}}{(4n_N [N_0])^{m_e} - 1} \\ [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{n_\sigma (4[N_0])^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T_{\min}}}{n_\sigma ((4[N_0])^{m_e} - 1)} \end{aligned} \right\} (2)$$

где (σ_{aF}) – амплитуда условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений, МПа;

n_σ, n_N – коэффициенты запаса прочности по напряжениям и числу циклов;

e_c^T – характеристика пластичности;
 R_c^T – характеристика прочности, МПа;
 $R_{p0,2}^T$ – минимальное значение условного предела текучести при температуре Т, МПа;
 E^T – модуль упругости при температуре Т, МПа;

m, m_e – вспомогательные параметры.

Максимальное количество циклов колебаний с частотой 9,8 Гц за 60 лет непрерывной работы составит примерно $1,9 \times 10^{10}$. Допускаемая амплитуда напряжений (σ_{aF}), получаемая для $1,9 \times 10^{10}$ циклов, применительно к трубе, изготовленной из 12Х18Н10Т, при расчетной температуре $t = 350^\circ\text{C}$ составит $[\sigma_{aF}] = 46,4$ МПа.

Таким образом, из результатов оценки циклической прочности следует, что для расчетной схемы трубопровода, учитывающей особенности реальной конструкции, значения полученных условных упругих приведенных напряжений существенно ниже допускаемой амплитуды напряжений.

⁶ Зенит-95. Программа расчета динамики и прочности конструкций, механизмов и приводов методом конечных элементов (МКЭ). – Режим доступа: <https://ntp-dip.ru/index.html> (дата обращения: 18.12.2024).

Реализация описанных выше расчетно-экспериментальных подходов позволит уйти от необходимости нормированных вибрационных характеристик трубопроводов (частоты или амплитуды колебаний) и рассматривать вибрационное нагружение в качестве одного из проектных режимов при оценке накопленного значения повреждения металла при циклически повторяющихся нагрузках.

Выводы

В данной статье рассмотрены вопросы управления старением динамически нагру-

женных трубопроводов. Предложено использование расчетно-экспериментального метода для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода при вибрационном воздействии с целью определения повреждаемости при циклически повторяющихся нагрузках [3–4]. Рекомендовано в качестве ресурсной характеристики при вибрационном нагружении трубопровода использовать не нормируемые частоты или амплитуды колебаний, а значения накопленных и предельных повреждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кравец С.Б., Кузин С.А. Современные подходы к определению нормируемых параметров вибрационного состояния паропроводов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):50–56. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>.

Kravets S.B., Kuzin S.A., Smolin A.Yu. Modern approaches to determining the standardised parameters of vibration state of NPP steam pipelines. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):52–57. (In Russ.). EDN: JFQRZB. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-07>

2. Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). Москва: Энергоатомиздат, 2010. 424 с. Режим доступа: https://elibraryatom.ru/text/arkadov_sistemy-diagnostirovaniya-vver_2019/p0/ (дата обращения: 20.12.2024).

3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. Москва: Машиностроение, 1977. 232 с. Режим доступа: <https://dwg.ru/dnl/5113> (дата обращения: 20.12.2024).

4. Кузьмичевский А.Ю., Гетман А.Ф. Методика расчета прочности и ресурса оборудования и трубопроводов АЭС в вероятностном аспекте. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2010;76(8):48–50.

Kuzmichevsky A.Yu., Getman A.F. Methodology for calculating the strength and service life of NPP equipment and pipelines in a probabilistic aspect. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2010;76(8):48–50. (In Russ.).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кравец С.Б. – анализ результатов расчетов и разработка рекомендаций;

Костикова М.М. – анализ результатов расчетов и разработка рекомендаций;

Кузин С.А. – проверка расчетов паропроводов;

Смолин А.Ю. – проведение расчетов паропроводов;

Дембицкий А. Е. – проведение расчетов паропроводов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kravets S.B. – analysis of calculation results and development of recommendations;

Kostikova M.M. – analysis of calculation results and development of recommendations;

Kuzin S.A. – checking steam pipeline calculations;

Smolin A.Yu. – carrying out calculations of steam pipelines;

Dembitsky A.E. – conducting calculations of steam pipelines.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования

FUNDING:

The study has no external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Борисович Кравец, начальник отдела, Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey B. Kravets, head of department, National Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>;

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Костикова Марина Михайловна, ведущий специалист, Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kostikova@secnrs.ru

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

<https://orcid.org/0000-0002-7384-5827>

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Александр Юрьевич Смолин, кандидат технических наук, доцент, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0148-2086>

e-mail: AYSmolin@mephi.ru

Артем Евгеньевич Дембицкий, кандидат технических наук, зав. кафедрой атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: demartev@yandex.ru

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Marina M. Kostikova, Leading Specialist, National Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation;

e-mail: kostikova@secnrs.ru

Sergey A. Kuzin, Associate Professor, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-7384-5827>

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Alexander Y. Smolin, Cand. Sci (Eng), Associate Professor, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0148-2086>

e-mail: AYSmolin@mephi.ru

Artyom E. Dembitsky, Cand. Sci (Eng), Head of the Department of Atomic Energy, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: demartev@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 23.12.2024

После доработки / Revised 14.03.2025

Принята к публикации / Accepted 18.03.2025

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY



<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-07>

EDN UGPXUX

Оригинальная статья / Original paper

Обоснование значений уровня в парогенераторах с РУ В-392м при нормальной эксплуатации и нарушении нормальной эксплуатации

П.В. Поваров

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС),
г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация

✉ nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Аннотация. Возможность несения нагрузки при переходных процессах без достижения условий срабатывания систем безопасности и аварийной защиты реактора называется динамической устойчивостью энергоблока АЭС. Регулирование уровня воды в парогенераторах РУ ВВЭР-1200 (В-392М) осуществляется для поддержания баланса между отводом пара, продувкой и подачей воды. Изменение уровня воды в парогенераторе, обусловленное переходными процессами, может привести к достижению уставок технологических защит и блокировок с последующим отключением главного циркуляционного насоса и снижением нагрузки. Анализ проведённых на этапах пусконаладочных испытаний энергоблоков Нововоронежской, Ленинградской и Белорусской АЭС, а также имевших место отключений основного оборудования по причине изменения уровня в парогенераторах позволил определить возможные пути повышения динамической устойчивости энергоблоков с РУ ВВЭР-1200. Поддержание номинального уровня воды в парогенераторе позволяет не допустить поступление на турбину пара с повышенной более 1% влажностью. Имеются реальные перспективы повышения динамической устойчивости энергоблоков ВВЭР-1200 за счёт модернизации запорной арматуры на узле питания парогенератора с повышением её быстродействия и соответствующих корректировок уставок по уровню воды в парогенераторе. Повышение динамической устойчивости энергоблоков ВВЭР-1200 позволит внести существенный дополнительный вклад в экономическую привлекательность усовершенствованного проекта АЭС отечественного дизайна.

Ключевые слова: ВВЭР, уровень воды в парогенераторе, уставка ТЗиБ, срабатывание АЗ, отключение ГЦНА.

Для цитирования: Поваров П.В. Обоснование значений уровня в парогенераторах с РУ В-392м при нормальной эксплуатации, нарушении нормальной эксплуатации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):67–73. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-07>

For citation: Povarov P.V. Justification of level values in steam generators with V-392m reactor unit during normal operation and normal operation disturbance. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):67–73. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-07>

Justification of level values in steam generators with V-392m reactor unit during normal operation and normal operation disturbance

Petr V. Povarov

Branch of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant (Novovoronezh NPP), Novovoronezh,
Voronezh Region, Russian Federation

✉ nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract. The ability to carry the load during transients without achieving the operating conditions of the safety and emergency control action of the reactor is called the dynamic stability of the NPP power unit. Water level control in steam generators RU VVER-1200 (V-392M) is carried out to maintain a balance between steam removal, purging and water supply. A change in the water level in the steam generator caused by transients can lead to the achievement of technological protection and blocking settings, followed by the shutdown of the main circulation pump and a reduction in load. An analysis of the commissioning tests of the Novovoronezh, Leningrad and Belorussian NPP power units, as

well as the shutdowns of the main equipment due to changes in the level in the steam generators, allowed us to identify possible ways to increase the dynamic stability of the VVER-1200 power units. Maintaining the nominal water level in the steam generator makes it possible to prevent steam from entering the turbine with an increased humidity of more than 1%. There are real perspectives for VVER-1200 power units dynamic stability improving by upgrading the shut-off valves at the steam generator power supply unit with increased performance and appropriate adjustments to the water level settings in the steam generator. Increasing the dynamic stability of the VVER-1200 power units will make a significant additional contribution to the economic attractiveness of the improved nuclear power plant design of domestic design.

Keywords: VVER, steam generator level, technological protection and blocking setting, emergency control action, main circulation pump shutdown.

Измерение уровня воды в парогенераторах ПГВ-1000МКП (ПГ) РУ с В-392М [1] осуществляется гидростатическим методом, то есть путем сравнения давления переменного гидростатического столба воды в парогенераторе («минус») с давлением постоянного гидростатического столба конденсата («плюс»), создаваемого с помощью уравнительного сосуда. Уравнительный сосуд в комплекте с преобразователем разности давлений (дифманометром) называют уровнемером. На ПГ предусмотрены штуцеры (по два на каждый уровнемер) для отбора стати-

ческого давления и подсоединения уравнительных сосудов и преобразователей разности давлений. Уравнительные сосуды располагаются непосредственно у парогенератора, дифманометры располагаются в помещениях датчиков КИП вне герметичной оболочки и подсоединяются к ПГ и УС посредством трубных импульсных линий.

Измерение уровня питательной воды в ПГВ-1000МКП осуществляется с помощью семи однокамерных уравнительных сосудов (УС-1÷УС-7) и одного двухкамерного уравнительного сосуда УС-8 (рис. 1).

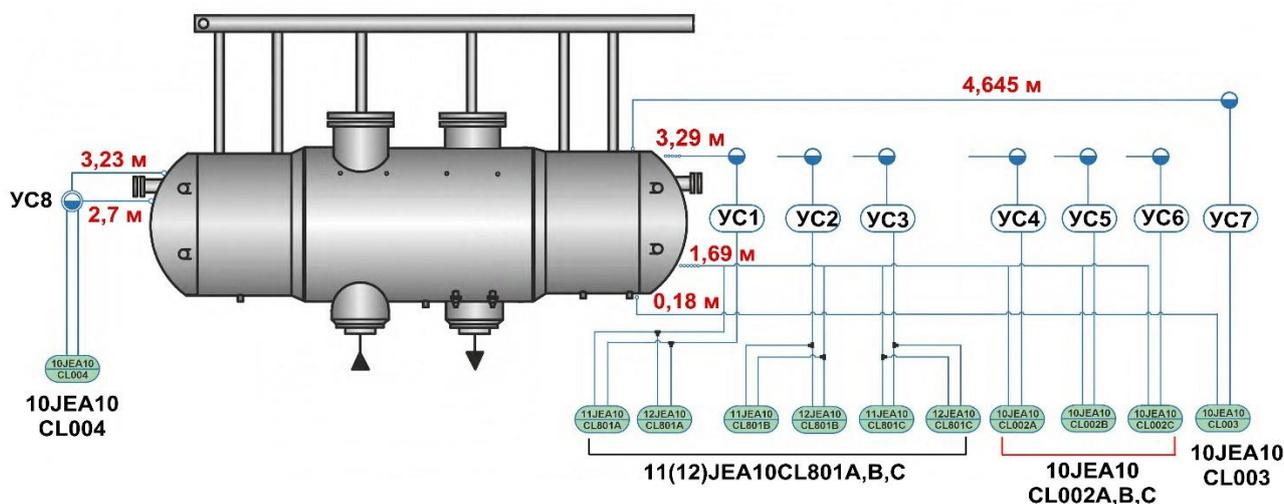


Рисунок 1. Расположение уравнительных сосудов на парогенераторе ПГВ-1000МКП
Figure 1. Location of reference vessels on the PGV-1000MKP steam generator

Для однокамерных уровнемеров в сигналы датчиков вводится автоматическая коррекция по давлению в ПГ. Для двухкамерного уровнемера УС-8 подобная коррекция не предусмотрена.

Однокамерные уровнемеры УС-1÷УС-6 имеют базу 1,6 м (уровнемеры с «малой» базой), уровнемер УС-7 имеет базу 4,465 м («большая» база).

Для повышения точности контроля и управления (например, работы регулятора уровня ПГ) используют усредненные показания от датчиков уровнемеров УС-1÷УС-6.

Назначение уровнемеров парогенератора представлено в таблице 1.

Таблица 1. Назначение уровнемеров ПГВ-1000МКП

Table 1. Purpose of PGV-1000MKP level gauges

№ УС	База уровнемера	Назначение сигнала	Представление информации
УС-1	1,69÷3,29 (1,6) м	АЗ-УСБТ	<ul style="list-style-type: none"> показывающие приборы на панелях безопасности (БПУ, РПУ) видеокадр СВБУ «JEA10-40»
УС-2			
УС-3		ТЗБ, регулятор, СВБУ	<ul style="list-style-type: none"> показывающие приборы на панелях РО и ТО (БПУ); видеокадр СВБУ «JEA10-40»
УС-4			
УС-5			
УС-6			
УС-7	0,180÷4,645 (4,465) м	Контроль заполнения / дренаживания ПГ	видеокадр СВБУ «JEA10-40»
УС-8	2,70÷3,23 (0,53) м	СВБУ	видеокадр СВБУ «JEA10-40»

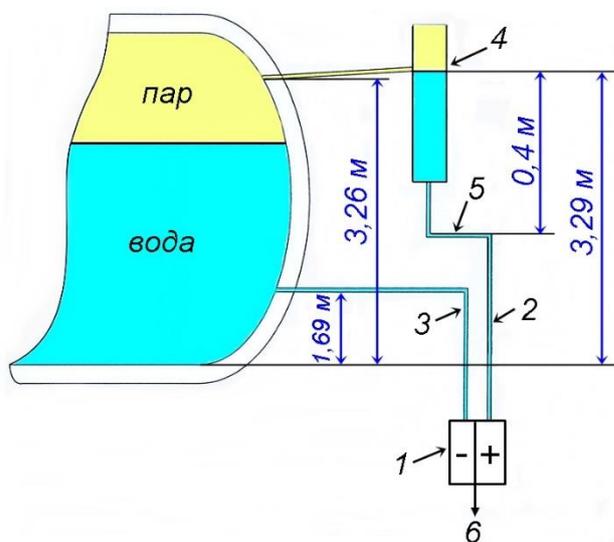
Примечание. В скобках указано значение базы уровнемера без учёта расположения минусового и плюсового штуцера относительно начала шкалы

Сигналы от уравнильных сосудов (УС-1, УС-2, УС-3) используются для организации защит управляющей системы безопасности (УСБТ) и выполнены по независимым каналам.

Однокамерный уравнильный сосуд состоит из корпуса, штуцеров и доннышек. Через верхний штуцер сосуд соединяется с паровым объёмом парогенератора, к нижнему штуцеру подсоединяется «плюсовая» линия преобразователя разности давлений.

Уровень воды в уравнильном сосуде поддерживается постоянным за счет конденсата, образующегося при конденсации пара в верхней части УС. Излишек воды при этом сливается из уравнильного сосуда обратно в ПГ за счет того, что соединительные трубки выполнены с уклоном в сторону корпуса ПГ.

На рисунке 2 представлена схема измерения уровня в ПГ с помощью однокамерного уравнильного сосуда с «малой» базой.



1. Дифманометр
2. «Плюсовая» линия дифманометра
3. «Минусовая» линия дифманометра
4. Однокамерный уравнильный сосуд
5. Горизонтальный участок стабилизации
6. Токовый сигнал $20 \div 4$ мА, соответствующий изменению перепада давления при изменении уровня от 1,69 до 3,29 м.

Рисунок 2. Схема измерения уровня в ПГ с помощью однокамерного УС

Figure 2. Scheme of level measurement in a steam generator using a single-chamber reference vessel

Двухкамерный уровнемер не задействован в ТЗБ и в регулировании уровня. Он предназначен для измерения уровня воды над погружным дырчатый листом (ПДЛ) при проведении сепарационных испытаний ПГ и для настройки однокамерных уровнемеров.

Опыт эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 (энергоблоки с РУВ-392М, Рус В-491) показывает, что при нарушении нормальной эксплуатации оборудования систем подпитки-продувки первого контура, питательной воды, основного конденсата, циркуляционной воды, происходит повыше-

ние уровня в парогенераторах. В переходных процессах возможно достижение уставок технологических защит и блокировок (ТЗиБ) на отключение основного оборудования энергоблока: главного циркуляционного насоса (ГЦНА), турбогенератора (ТГ). Таким образом, не обеспечивается динамическая устойчивость энергоблока. В качестве критерия динамической устойчивости принимается условие не достижения в переходных процессах уставок срабатывания аварийной защиты реактора, включения в работу систем безопасности, а также уставок на срабатывание технологических защит, приводящих к отключению основного оборудования и/или снижению нагрузки [2].

В течение 15 топливных кампаний на энергоблоках №№ 6 и 7 Нововоронежской АЭС произошло 5 случаев отключения ГЦНА при повышении уровня в ПГ в переходных режимах, связанных с отключением циркуляционных насосов, ростом уровня в сепараторе, повышением давления в конденсаторах турбины, срабатыванием аварийной защиты.

В соответствии с проектом в нормальных условиях эксплуатации система питательной воды должна поддерживать в парогенераторе номинальный уровень (2700 ± 50) мм по показаниям однокамерных уравнительных сосудов на «холодном» днище ПГ с влажностью отбираемого пара не более 0,2 %¹.

При увеличении уровня воды в парогенераторе на «+200 мм» от номинального значения и запасе до кипения в каждой из горячих ниток более 15,5 °С отключается ГЦНА соответствующей петли. Основная защитная функция отключения оборудования энергоблока при повышении уровня в ПГ заключается в предотвращении (ограничении) дальнейшего роста уровня в парогенераторах с целью недопущения поступления на турбину пара с повышенной влажностью.

Фактические сепарационные характеристики парогенераторов на энергоблоках № 6 и № 7, в том числе зависимость влажности пара при изменении уровня в ПГ были опре-

делены в ходе проведения сепарационных испытаний при проведении пусконаладочных работ (ПНР). Целью сепарационных испытаний являлось подтверждение проектного значения номинального уровня в ПГ при нормальной эксплуатации. В рамках ПНР выполнены сепарационные испытания ПГ энергоблоков № 6 и № 7 НВАЭС, получены сепарационные характеристики и предельно-допустимые уровни, обеспечивающие влажность пара на выходе из ПГ не более 0,2%².

На рисунке 3 представлены результаты сепарационных испытаний ПГ-3 энергоблока № 6, на рисунке 4 представлена аппроксимация зависимости влажности пара от уровня в ПГ по 4-м парогенераторам полиномом 6-й степени.

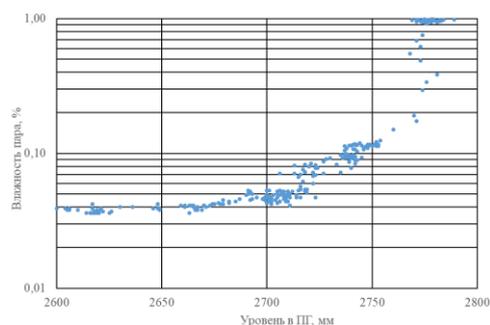


Рисунок 3. Результаты сепарационных испытаний ПГ-3 энергоблока № 6

Figure 3. Results of separation tests of PG-3 of power unit No. 6

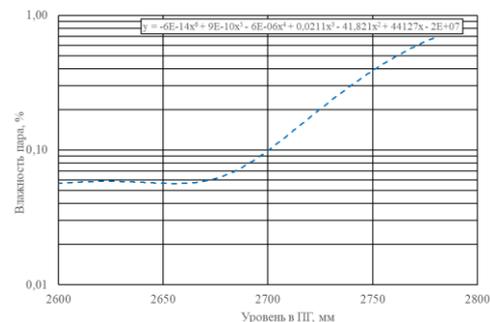


Рисунок 4. Аппроксимация по четырем парогенераторам блока № 7

Figure 4. Approximation for four steam generators of power unit No. 7

¹ Инструкция по эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000МКП 20JEA10,20,30,40AC001 энергоблока №2 Нововоронежской АЭС-2. Версия 2, 2023.

² «Расчетный анализ режимов нормальной эксплуатации и с нарушением нормальной эксплуатации систем и оборудования энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2 по теме: «Комплексный анализ режимов с отключением основного оборудования первого и второго контуров и разработка рекомендаций по повышению динамической устойчивости энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ. Технический отчет ВНИИАЭС, 2017.

В результате испытаний установлено, что на энергоблоках № 6 и № 7 Нововоронежской АЭС наиболее неблагоприятным по сепарационным характеристикам является парогенератор № 4 7-го блока, предельное значение по влажности отбираемого пара 0,2 % достигается при уровне в ПГ 2715 мм. На основании анализа обобщенных результатов сепарационных испытаний, с учетом погрешности измерения уровня в ПГ 25 мм, в качестве номинального уровня ПГ на энергоблоках № 6 и № 7 НВАЭС³ принято значение 2600 мм.

В случае отказа основного регулирующего клапана при медленном повышении уровня в ПГ, после формирования сигнала на закрытие отсечной задвижки (уставка закрытия запорной арматуры на узле питания ПГ «+150») и работающем ГЦНА в переходном процессе, возможна циклическая работа задвижки в режиме закрытия-открытия с опасностью «раскачки» уровня и вероятностью достижения условий срабатывания АЗ по снижению уровня в ПГ. Такие случаи циклической работы отсечной задвижки в режиме закрытия-открытия со срабатыванием АЗ по снижению уровня в ПГ при некорректной работе узла питания ПГ зафиксированы в базе данных по нарушениям в работе АЭС. При этом инерционность сигнала по уровню – 1 с; время прохождения команды в цепях при закрытии запорной задвижки – 0,5 с.

В расчетном анализе режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации систем и оборудования энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2, выполненном ВНИИАЭС, сформулированы предложения, направленные на расширение пределов повышения уровня в ПГ без отключения основного оборудования, с реализацией ряда мероприятий по модернизации. Так, отсечную задвижку целесообразно модернизировать, увеличив ее быстродействие до 25÷30 с, что позволит обосновать расширение допустимого диапазона изменения уровня в ПГ с корректировкой уставок ТЗиБ

на одновременное закрытие задвижки и отключение ГЦНА при повышении уровня в ПГ до «+300» мм от номинального. Подобное решение в своё время было реализовано и подтверждено положительным опытом эксплуатации в рамках модернизации узла питания ПГ на АЭС с ВВЭР-1000.

По условиям эксплуатации турбоустановки допускается длительная работа турбины при начальной влажности свежего пара не более 0,5 % при нормальной эксплуатации, а также допускается временное повышение влажности до 1,0 % в переходных процессах, в режимах с отклонениями от нормальных условий эксплуатации и при отклонениях параметров, вызванных работой регуляторов ПГ [3].

По данным расчетов⁴, для начала и конца кампании 18-ти месячного топливного цикла с применением программного технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»⁵ и расчетного кода RELAP5/Mod3.2⁶ время превышения уровня воды в переходном процессе от номинального до уровня, соответствующего уставке отключения ГЦНА в наихудшем по сепарационным свойствам ПГ составляет не более 30 с., при влажности пара – 1 % . При отключении ГЦНА в ПГ практически сразу прекращается парообразование и поступление влажного пара в проточную часть турбины.

Кроме того, проточная часть турбины К-1200/6.8/50 (рис. 5) имеет эффективную систему влагоудаления:

³ Отчет по обоснованию безопасности. Нововоронежская АЭС-2. Энергоблок № 2. Глава 15 «Анализ аварий», 2016.

⁴ Технический отчет ВНИИАЭС «Расчетный анализ режимов нормальной эксплуатации и с нарушением нормальной эксплуатации систем и оборудования энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2 по теме: «Комплексный анализ режимов с отключением основного оборудования первого и второго контуров и разработка рекомендаций по повышению динамической устойчивости энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ. ВНИИАЭС», 2024.

⁵ Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР, АО «Концерн Росэнергоатом», Режим доступа: <https://www.rosenergoatom.ru/about/programmnye-produkty/virtualno-tsifrovaya-aes-s-vver/> (дата обращения: 22.12.2024).

⁶ Программа RELAP5\Mod3.2 для теплогидравлического расчета переходных и аварийных режимов РУ ВВЭР. Регистрационный номер паспорта аттестации программного средства, №180 от 28.10.2004.

- применение торцевой сепарации влаги с поверхности наружного бандажа диафрагмы;
- организация периферийного влагоудалителя за направляющим аппаратом;
- внутриканальное влагоудаление через систему узких щелей на выпуклой и вогнутой поверхностях во внутренние полости направляющих лопаток;
- организация дробления и сброса влаги с вогнутой поверхности направляющих лопаток вблизи выходной кромки.

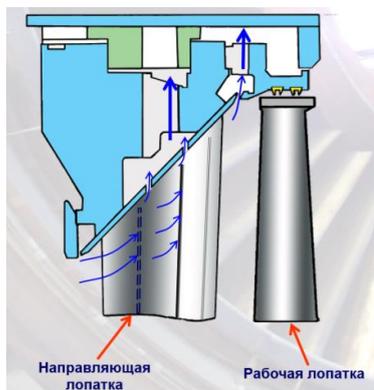


Рисунок 5. Система влагоудаления проточной части турбины K-1200/6.8/50
Figure 5. Moisture removal system of the flow section of K-1200/6.8/50 turbine

По результатам анализа отраслевой базы данных Npp Exr на энергоблоках с ВВЭР-1200 (Нововоронежская, Ленинградская, Белорусская АЭС) за время эксплуатации произошло 10 случаев отключения ГЦНА по уставке превышения уровня 2900 мм в переходных процессах, связанных с отказами оборудования систем питательной воды, основного конденсата, циркуляционной воды. В 3-х событиях зафиксировано кратковременное увеличение показаний уровнемеров ПГ до $L_{ном} + 200$ мм. В 5-ти событиях имело

место «перепитка» ПГ в переходных процессах энергоблока. Коренными причинами обоих этих групп событий определены проектные несоответствия, связанные с уставками ТЗиБ, а также недостатки проектного алгоритма узла питания ПГ, приводящие к повышению уровня котловой воды в ПГ. В 3-х событиях эти несоответствия привели к срабатыванию АЗ, в 2-х – к дополнительным разгрузкам энергоблока.

При этом ни в одном из случаев не зафиксировано повреждение элементов проточной части турбины.

Выводы

Опыт эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 показывает, что в переходных процессах при нарушении нормальной эксплуатации с повышением уровня в парогенераторах возможно достижение уставок ТЗиБ на отключение ГЦНА.

В качестве номинального уровня ПГ, по результатам сепарационных испытаний, на энергоблоках ВВЭР-1200 принято значение 2600 мм, с учетом погрешности измерения уровня в ПГ – 25 мм.

В рекомендациях ВНИИАЭС по повышению динамической устойчивости предлагается повысить быстродействие запорной задвижки на основной линии узла питательной воды ПГ.

Существенно повысить динамическую устойчивость энергоблока возможно также за счет комплексного изменения уставок ТЗиБ по повышению уровня в ПГ, сохранив уставку отключения ГЦНА при повышении уровня в ПГ – 2900 мм и тем самым увеличив оперативный запас для регулирования уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., Платонов П.Д., Украинцев И.Ф. и др. Оборудование и технологические системы нормальной эксплуатации ядерной установки в проекте АЭС-2006. Воронеж: Кварта, 2023. 780 с.
2. Гусев И.Н., Смородинов Д.С., Казаков К.В., Жуденков В.В., Мамонтов Г.А. К вопросу динамической и эксплуатационной устойчивости энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;1:18–27. <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.02>
- Gusev I.N., Smorodinov D.S., Kazakov K.V., Zhudenkov V.V., Mamontov G.A. On dynamic and operational stability of NPP power units with VVER-1200. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024;1:18–27. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.02>

3. Лисянский А.С Разработка мощных паровых турбин для быстроходной энерготехнологии АЭС : автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.04.12. Санкт-Петербург, 2014. 35 с. Режим доступа: <https://click.ru/3HaU59> (дата обращения: 22.12.2024).

Lisyansky A.S. Development of high-power steam turbines for high-speed power technology of NPP. Abstract of disc. ... Doctor of technical sciences 05.04.12. St Petersburg, 2014. 35 p. Available at: <https://click.ru/3HaU59> (accessed: 22.12.2024).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Автор заявляет об отсутствии источников финансирования.

FUNDING:

The author declares no sources of funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

Поваров Пётр Владимирович, начальник РЦ-6 филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Российская Федерация.
e-mail: pv_povarov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Petr V. Povarov, Head of the Reactor Department, Novovoronezh Nuclear Power Plant a branch of Rosenergoatom Concern JSC , Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: pv_povarov@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 30.12.2024

После доработки / Revised 13.03.2025

Принята к публикации / Accepted 18.03.2025

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-2025-01-08>

EDN UTLJKM

Оригинальная статья / Original paper

**Роль и значение управления развитием имиджа атомградов
в современных условиях**

Т.С. Попова¹  , **Н.Д. Задорожная²** , **А.А. Попов³** , **А.А. Воронов⁴** 

^{1,2} Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

³ Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

⁴ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

 tspopova@mephi.ru

Аннотация. В качестве объекта исследования в данной статье были выбраны атомграды – российские города, в которых сосредоточены предприятия, связанные с производством и промышленным использованием ядерной (атомной) энергии. К этому списку авторами были отнесены города расположения атомных электростанций и закрытые административные территориальные образования (ЗАТО) атомной промышленности. В настоящее время в городах присутствия Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» проживает более 2,35 млн. человек. Развитие этих территорий, как каркаса развития всей нашей страны – одна из важных задач Госкорпорации. Предметной областью в исследовании является воссоздание и поддержка идентичности так называемого «фирменного образа» общественных пространств атомградов (парков, скверов, зон отдыха). В статье предлагается сделать это за счет дооснащения обозначенных мест малыми архитектурными формами единого для всех атомградов архитектурного стиля (в виде мирного атома, градирен, реактора и т.д.). Цель исследования – предложить такое проектное решение, которое позволит возродить утерянные со временем традиции в части создания единого архитектурного образа парков и скверов городов присутствия Госкорпорации «Росатом», повысив при этом комфортность городских общественных пространств данных городов. В качестве основных методов при написании статьи выступили теоретический анализ научной литературы по проблематике создания и повышения имиджа территорий, систематизация имеющегося материала, его графическая визуализация и другие. Основным результатом исследования выступает обоснование целесообразности разработки макетов малых архитектурных форм (скамеек, урн, вазонов, входных зон, фонарных столбов, велопарковок и др.), по внешнему виду и форме которых можно идентифицировать принадлежность парка (сквера) к городу присутствия объекта атомной энергетики. Это в свою очередь позволит возродить единый облик городских пространств атомградов, положительно скажется на росте уровня привлекательности для туристического потока и на комфортности общественных пространств для местного населения.

Ключевые слова: имидж территорий, ГК «Росатом», производство малых архитектурных форм, проект развития территорий, территориальный маркетинг, брендинг территорий, атомграды, атомная отрасль, городские пространства.

Для цитирования: Попова Т.С., Задорожная Н.Д., Попов А.А., Воронов А.А. Роль и значение управления развитием имиджа атомградов в современных условиях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):74–84. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-08>

For citation: Popova T.S., Zadorozhnaya N.D., Popov A.A., Voronov A.A. Role and significance of atomic city image development management in modern conditions. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):74–84. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-08>

Role and significance of atomic city image development management in modern conditions

Tatyna S. Popova¹  , Natalia D. Zadorozhnaya² , Andrey A. Popov³ ,
Alexander A. Voronov⁴ 

^{1,2} Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

³ «Atomash» the branch of JSC AEM-Technologies in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

⁴ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation
 tspopova@mephi.ru

Abstract. Atomic cities, Russian cities where enterprises related to the production and industrial use of nuclear energy are concentrated, are chosen as the object of research in this article. The authors will include in this list the cities of location of nuclear power plants and closed administrative territorial formations of the nuclear industry. Currently, more than 2.35 million people live in the cities where the State Atomic Energy Corporation «Rosatom» operates. The development of these territories as a framework for the development of our entire country is one of the important tasks of ROSATOM. The subject area of the study is to recreate and support the identity of the so-called “corporate image” of public areas of atomic cities (parks, squares, recreation areas). The article proposes to do this by equipping the designated places with small architectural forms of the architectural style common to all atomic cities (in the form of a peaceful atom, cooling towers, reactor, etc.). The objective of the study is to propose a design solution that will revive the traditions lost over time in terms of creating a unified architectural image of parks and public gardens in the cities where ROSATOM is present, while increasing the comfort of urban public spaces in these cities. The main methods of research are theoretical analysis of scientific literature on the problems of creating and improving the image of territories, systematization of the available material, its graphic visualization and others. The main result of the study is the justification of the feasibility of developing models of small architectural forms (benches, garbage bins, vases, entrance areas, lampposts, bicycle parking lots, etc.), the appearance and shape of which can identify the belonging of a park (public garden) to the city of presence of a nuclear power facility. This, in turn, will revive the unified appearance of urban spaces of atomic cities, and will have a positive impact on the growth of the level of attractiveness for tourist traffic and on the comfort of public spaces for the local population.

Keywords: image of territories, Rosatom State Corporation, production of small architectural forms, territorial development project, territorial marketing, branding of territories, atomic cities, nuclear industry, urban spaces.

Введение

Изначально понятие «имидж», этимологически означающее «образ» и «изображение», использовалось лишь в терминологии искусствоведов, художников. Позже, с развитием маркетинга, как науки и практики, имидж стал неотъемлемой чертой и характерной особенностью товара, продавца, политика, руководителя, блогера, компании, политической партии и других субъектов. Имидж стал не менее других факторов влиять на потребительский выбор и предпочтение, он стал инструментом повышения уровня приверженности, удовлетворенности и лояльности. Сегодня понятие «имидж» стало уместно применять и в отношении района, города, региона, государства.

В наши дни имидж той или иной территории становится достаточно важным ресурсом экономического развития, благополучия и процветания страны/региона/города. Это происходит по причине возрастающей роли и значимости информации для обеспечения

конкурентных преимуществ субъекта вне зависимости от его территориального масштаба. Сейчас неважно, какую территориальную единицу мы рассматриваем (отдельный хозяйствующий субъект или целое государство), именно имидж выступает в качестве локомотива при привлечении инвестиций или трудовых ресурсов, при расширении рынка сбыта и т.д. «Сильный» имидж становится основополагающим репутационным фактором, «невидимым активом» продвижения разного рода и масштаба проектных решений любой направленности, важнейшим конкурентным ресурсом для установления и развития партнерских отношений в регионе.

«Доброе имя» города, региона или страны все чаще рассматривается в качестве предпосылки для ускорения значимых для территории экономических, социокультурных, политических преобразований, повышения качества и уровня жизни местного населения, роста туристической привлекательности

и т.д. Благоприятный имидж во многом определяет успешность решения многих проблем, стоящих перед территориями, особенно усилившихся в сложный для страны санкционный период, период недостаточного финансирования из-за геополитической нестабильности и внешнеэкономического давления.

Территориальный имидж, прежде всего, базируется на наличии неких опознавательных характеристик города (региона, страны), которые отличают территорию от других. Эти индивидуальные отличия могут заключаться в комплексе визуальных и вербальных черт, присущих только конкретной территории, по которым ее можно идентифицировать и «вычлени» из множества схожих территорий. Имидж есть у любой территории. А какой он (сильный или слабый, положительный или отрицательный), какие впечатления, эмоции, ассоциации он вызывает у конечных пользователей – зависит от тактик, приемов, механик и методов, применяемых и пропагандируемых руководством конкретной территории. Да, на имидж, безусловно, первостепенное значение оказывают история, агроклиматические, рекреационные факторы, культура и традиции, но всё чаще именно грамотный административный ресурс выступает резервом экономического роста и инвестиционной привлекательности.

Материалы и методы

В качестве основных методов при написании статьи выступили теоретический анализ научной литературы по проблематике создания и повышения имиджа территорий, систематизация имеющегося материала, его графическая визуализация и другие.

Так, в качестве теоретической базы исследования выступили труды следующих авторов (ученых и практиков):

– А.И. Костенников в исследованиях излагает концептуальные подходы и организационно-методические рекомендации по совершенствованию элементов маркетингового механизма повышения инфраструктурной привлекательности территорий [1];

– А.В. Окрочкова в своих работах изучает проблемы и способы формирования функ-

ционального имиджа муниципальных образований и рассматривает их как стратегический фактор эффективного менеджмента территорий [2];

– Н.Ю. Лесных пишет о том, что маркетинг территории создает благоприятный имидж региона, что повышает эффективность инвестирования, позволяет региону быть «увиденным» государством и дает возможность региону попасть в одну из федеральных целевых программ, получив финансовую поддержку особо удачных проектов [3];

– Р.В. Колесов, Г.А. Бабаджанян, В.С. Невидина, работы посвятили изучению и разработке методических подходов для оценки эффективности маркетинговой стратегии в регионах Российской Федерации [4];

– А. Делидов в своей работе, посвященной городу Новоуральску, как городу, возникшему в рамках реализации атомного проекта СССР, анализирует проблему общественных мест атомграда, акцентируя внимание на том, что исследователи уделяют мало внимания на городскую архитектуру, на искусственную среду обитания горожан. Также автор указывает на то, что Новоуральск в настоящее время выстраивает свой имидж для дальнейшего развития и повышения привлекательности [5];

– И.А. Ухалина, Н.А. Ефименко, А.В. Анцибор указывают в своем исследовании на то, что города присутствия ГК «Росатом» обеспечивают устойчивое развитие не только предприятий корпорации, но и прилегающих территорий, пространственное развитие которых требует постоянных инвестиций для создания стабильной работы предприятий, развития инфраструктурных связей, комфортной городской среды, привлекательной для жизни молодых перспективных специалистов [6];

– Е.Н. Камышанченко, С.А. Морусов считают, что каждый регион пытается дифференцировать и отделить себя от других путем профилирования своего экономического и жизненного пространства. Эффективная региональная маркетинговая стратегия обеспечивает создание узнаваемой системы уникальных особенностей региона, что является

ключевым фактором привлечения в регион инвестиций [7];

– А.Г. Константинов авторское исследование посвятил проблеме формирования социально-культурной среды закрытых административно-территориальных образований (ЗАТО) Урала. Автор описывает факторы, оказавшие наибольшее влияние на жизнедеятельность населения таких атомградов, как Лесной, Новоуральск, Озерск, Снежинск и Трехгорный [8];

– Т.С. Степченко, В.С. Матузков на примере Ростовской области проследили тенденции в сфере инвестиционных отношений между федеральным центром и регионом присутствия объектов атомной промышленности [9];

– В.А. Руденко, Т.С. Попова, П.В. Горлачев и соавторы в учебном пособии рассматривают сущность, содержание процессов управления территориальным развитием в конкурентной рыночной среде. Авторами выявлены функции, задачи и роль государственного и муниципального управления в развитии социально-экономической среды территорий¹.

Анализ литературных источников позволил сделать вывод о том, что большинство авторов сходятся во мнении, что имидж региона – это комплексное понятие, требующее системного подхода и грамотного маркетингового управления территорией.

Кроме научной литературы в качестве теоретической базы исследования авторы использовали также положения «Единой отраслевой политики Госкорпорации «Росатом» и ее организаций в области устойчивого развития» и положения «Единой отраслевой политики Госкорпорации Росатом» и ее организаций по правам человека», данные Государственного комитета статистики и т.д.

Обсуждение и результаты

Как было сказано ранее, имидж территории играет важную роль в формировании восприятия и отношения людей к определенному месту. В данном исследовании авторы предлагают обратить внимание на развитие имиджа атомградов. Но прежде чем говорить об имидже атомных городов, для начала хотелось бы остановиться на истории их появления, поскольку именно исторические факторы в последующем повлияли на специфические черты и индивидуальность атомградов.

Итак, начало интереса к атомной энергии принято отождествлять с фигурой академика В.И. Вернадского. По его мнению, 1902 г. можно считать началом изучения физических и химических свойств радиоактивности. Вернадский говорил: «...владение большими запасами радия даст владельцам его силу и власть, перед которыми может побледнеть то могущество, какое получают владельцы золота, земли и капитала» [10].

В июне 1911 г. под руководством В.И. Вернадского первый отряд Радиевой экспедиции выехал на Миасский завод. В ходе экспедиции было добыто почти 12 килограммов радиоактивных минералов для супругов Кюри, производивших в то время эксперименты по изучению радиоактивности. В последующие годы данное направление несколько затормозилось. В 1940 г. В.И. Вернадский вновь заговорил о необходимости активизировать работы по изучению и использованию запасов урановых руд страны, но началась война. В сентябре 1942 г. Государственный комитет обороны СССР принял решение возобновить работы по урановой проблеме, а затем появилось постановление о добыче урана. Научным руководителем был назначен И.В. Курчатов, которого по сей день считают сердцем и мозгом Атомного проекта СССР. В ходе исследований под его руководством было открыто самопроизвольное деление ядер урана. Немногим позже В.И. Курчатов возглавил Лабораторию №2 Академии наук СССР (ныне Курчатовский институт), созданную для разработки технологии управления реакцией деления ядер

¹ Руденко В.А., Попова Т.С., Горлачев П.В. [и др.]. Управление территориями в конкурентной рыночной среде. Краснодар: Индивидуальный «Новация», 2021. 270 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46216275&ysclid=m87beokey4801197965> (дата обращения: 11.01.2025)

урана и исследований возможности военного применения атомной энергии.

20 августа 1945 г., после атомной бомбардировки США японских городов, решением Государственного комитета обороны образован Специальный комитет, который взял на себя руководство всеми работами по реализации атомного проекта:

- развитие научно-исследовательских работ;
- развертывание геологических разведок и создание сырьевой базы для добычи урана;
- организация промышленности по переработке урана, производству специального оборудования и материалов;
- строительство атомно-энергетических установок;
- разработка и производство атомной бомбы [11].

Данные виды деятельности были рассредоточены по населенным пунктам Советского Союза, таким как город Саров, поселок Верх-Нейвинск, город Озерск, город Снежинск, город Трехгорный и др. В атомных городах нашей страны ценой огромных усилий создавался «ядерный щит», позволивший защитить страну от ядерного шантажа. В них же страна создала и атомную бомбу, но только не для того, чтобы напасть на кого-то, а для того, чтобы защититься от планов уничтожения СССР. В атомградах жили и трудились без права на ошибку, под давлением сложного и сжатого времени, полагаясь на холодный разум тысячи физиков, химиков, математиков, ученых, инженеров, технологов, разведчиков, госслужащих, самоотверженность которых по сей день позволяет обеспечивать защиту стране от внешних угроз и поддерживать имидж на международной арене. Благодаря их слаженным действиям и достигнутым результатам обеспечивается безопасность России и ядерное равновесие в мире. Именно в атомных городах первыми в мире построили АЭС, впервые применили атомные технологии в освоении космоса, в транспорте, медицине.

Все заслуги, достижения, свершения, открытия, триумфы, победы и результаты функционирования атомных городов настолько велики, что даже самая высокая

их оценка будет правильной, нельзя будет сказать, что этот вклад оценен выше, чем следовало бы. Именно благодаря атомградам достигаются такие национальные цели и амбициозные технологические проекты страны, как обеспечение устойчивого экономического и социального развития; укрепление государственного, культурно-ценностного и экономического суверенитета; технологическое лидерство, экологическое благополучие; сохранение населения; укрепление здоровья и повышение благополучия людей и пр. Всё перечисленное вкуче формирует положительный имидж городов присутствия объектов атомной энергетики в глазах и умах заинтересованных сторон (жителей, представителей бизнеса, инвесторов, туристов и др.).

По данным Росстата численность населения России на 1 января 2025 г. оценивается в 146028325 человек, совокупная численность проживающих в 31 атомграде на ту же дату – всего 2352789 человек, то есть всего 1,61% от общей численности проживающих в стране людей (табл. 1)².

Несмотря на свою малую численность, города, в которых сосредоточены предприятия, связанные с производством и промышленным использованием ядерной энергии, могут смело претендовать на звание «городов-спутников», «городов-передовиков», которые вносили и вносят неопределимый вклад в индустриальное, экономическое и научное развитие всей страны, в формирование ее положительного имиджа как среди внутренних пользователей, так и на международной арене.

Первые города атомщиков были построены в середине прошлого века по типовым градостроительным планам, разработанным в недрах Государственного союзного проектного института №11. Для жилых домов и домов культуры, кинотеатров и парков культуры были разработаны типовые архитектурно-планировочные решения.

² Население России, численность в 2025 и 2024. – BDEX. – Режим доступа: <https://bdex.ru/naselenie/russia/> (дата обращения: 11.01.2025)

Таблица 1. Численность населения, проживающего в атомградах на 01.01.2025, чел.

Table 1. Population living in atomic cities as of 01.01.2025

№ п/п	Город	Регион	Численность населения, чел.
1	Ангарск	Иркутской области	224630
2	Балаково	Саратовская область	187523
3	Билибино	Чукотский АО	5777
4	Волгодонск	Ростовская область	171406
5	Глазов	Республика Удмуртия	92334
6	Десногорск	Смоленская область	27259
7	Димитровград	Ульяновская область	113472
8	Железногорск	Красноярский край	82591
9	Заречный	Свердловская область	31269
10	Заречный	Пензенская область	65502
11	Зеленогорск	Красноярский край	61633
12	Ковров	Владимирская область	135715
13	Краснокаменск	Забайкальский край	51387
14	Курчатов	Курская область	38125
15	Лесной	Свердловская область	49256
16	Неман	Калининградская область	10756
17	Нововоронеж	Воронежская область	31540
18	Новоуральск	Свердловская область	80357
19	Обнинск	Калужская область	117419
20	Озерск	Челябинская область	78440
21	Певек	Чукотский АО	5480
22	Полярные Зори	Мурманская область	14196
23	Саров	Нижегородская область	96052
24	Северск	Томская область	106516
25	Снежинск	Челябинская область	52099
26	Сосновый Бор	Ленинградская область	67720
27	Трехгорный	Челябинская область	32665
28	Удомля	Тверская область	27186
29	Усолье-Сибирское	Иркутская область	76047
30	Электросталь	Московская область	163901
31	Энергодар	Запорожская область	54536
Всего человек			2352789

Руководство городов «собирало» из этого конструктора свой атомный город. Неудивительно, что поселения получились породственному похожими друг на друга. Но к середине 1990-х строительные предприятия атомных городов акционировались и начали работать как коммерческие структуры. Соответственно, и проектные решения для строительства и благоустройства каждая компания искала для себя сама, наиболее выгодные именно для нее. Постепенно был утерян и тот единый облик, по которому изначально можно было бы отличить и идентифицировать атомграды среди остальных городов страны. Как следствие, на сегодняшний день налицо утрата единого архитектурного стиля общественных пространств атомных городов.

Хоть после распада СССР отношения между городами АЭС и их градообразующими предприятиями кардинально не изменились, но всё же они перешли на «квазирыночный» уровень. Такие отношения предполагают поиск компромиссов между интересами Росатома и городскими муниципалитетами, определение необходимых мероприятий, направленных на развитие атомградов. Для этого необходим системный подход к определению драйверов социально-экономического развития территории. При таком подходе следует относиться к городам как объектам, каждый из которых имеет свои специфические особенности [12], но в то же время входит в единый «территориальный контур» Росатома.

Так, с 2006 г., ведёт свою деятельность программа «Территория культуры Росато-

ма». Одной из главных задач программы можно назвать формирование единого социокультурного пространства между атомградами, усиление интенсивности их взаимодействия³.

В настоящее время Госкорпорация «Росатом» активно работает над созданием максимально комфортной инфраструктуры в городах своего присутствия. Соглашения с регионами присутствия госкорпорации «Росатом» являются основным форматом двустороннего сотрудничества «Росатома» и субъектов РФ. Они предполагают участие субъекта в развитии территорий присутствия госкорпорации, а также содействие реализации инвестиционных программ и проектов в рамках стратегии «Росатома». Ежегодно для каждого «атомграда» стороны соглашений о сотрудничестве утверждают перечень мероприятий социально-экономического и инфраструктурного развития и определяют объём финансирования. Для увеличения комфортной жизни в городах атомграда в 2023 г. стартовала программа «Люди и города», направленная на повышение качества жизни в городах присутствия. Конечная цель проекта – превратить города Росатома в лидеров по уровню качества жизни и технологическому развитию в масштабах всей страны.

Также ежегодно начиная с 2018 г. проводится всероссийский конкурс создания комфортной городской среды Минстроя России, включенный в федеральный проект «Формирование комфортной городской среды» нацпроекта «Жилье и городская среда», нацеленного на развитие благоустройства в малых городах и исторических поселениях России, в котором участвуют все города России. «Атомные города» ежегодно участвуют в данном конкурсе, поскольку это хорошая возможность получить грант для реализации проектов по созданию привлекательных городских пространств. В 2023 г. 14 атомных городов стали победителями. Полученные инвестиции становятся

неплохим подспорьем в повышении имиджа атомградов.

Благодаря двухстороннему соглашению, для городов, получивших федеральный грант на благоустройство концерн «Росэнергоатом» оказывает финансовую и методическую помощь при подготовке проектов, выделяет средства на разработку концепции благоустройства, проектно-сметной документации и выполнение строительно-монтажных работ, что способствует повышению качества комфортной жизни людей и также является важным этапом работы по созданию комфортных пространств.

В свое время руководитель Росатома Сергея Кириенко формулировал важнейший принцип взаимодействия с территориями присутствия: атомные города должны быть во всех аспектах привлекательны для жителей, предоставляя максимально возможный уровень социальных, образовательных, культурных услуг⁴. Ежегодно благодаря программе реализуется целый ряд проектов и мероприятий. Это концерты и спектакли с участием ярких артистов и коллективов, поддержка талантов и дарований, мастер-классы ведущих экспертов, образовательные и просветительские акции, масштабные социокультурные проекты. Оказывается помощь театрам, музеям, библиотекам и другим учреждениям культуры атомградов. Все это способствует развитию социально-культурных ценностей городов.

По мнению авторов настоящей статьи также стоит уделять внимание и территориальному благоустройству городов. На сегодня можно заметить, что парки, скверы и прочие общественные пространства атомградов «разобщены», нет единого архитектурного стиля, присущего атомным городам десятилетия назад. Для воссоздания единства стиля при оформлении общественных городских пространств атомградов предлагается оснащение их малыми архитектурными формами, которые позволят

³ О развитии культуры на территориях присутствия Росатома от 27.11.2024. Режим доступа: <https://atomvestnik.ru/2024/11/27/kultura-v-shagovoj-dostupnosti/>

⁴ О развитии городов на территориях присутствия Росатома от 27.11.2024. Режим доступа: <https://atomvestnik.ru/2024/11/27/delaem-goroda-rosatoma-luchshe/>

возродить утраченные традиции в части создания единого архитектурного образа парков и скверов, одновременно повысив при этом комфортность городских общественных пространств данных городов.

Малые архитектурные формы (МАФы) – это конструкции, имеющие практическое и декоративное назначение, используемые для организации пространства с целью обеспечения комфортного времяпровождения и досуга. Это могут быть входные парковые зоны, скамейки, болларды, фонарные столбы, вазоны и клумбы, велопарковки, различные тематические арт-объекты и т.д. Авторы предлагают наладить производство не стандартных МАФов, а таких, которые по своему внешнему виду будут походить на объекты атомной отрасли. Перечисленные МАФы могут быть сделаны

в виде реакторов, градирен, всем известного «мирного атома» и т.д. При помощи нейросети авторы создали прототипы обозначенных изделий (рис. 1). На каждом изделии предлагается ставить логотип союза организаций атомной отрасли⁵.

Производство МАФ может происходить из различных материалов, но наиболее долговечным и антивандальным является бетон. Авторы предлагают рассмотреть вариант производства из фибробетона, который обладает уникальными свойствами, которые требуются для любых конструкций уличной эксплуатации: антивандальность, высокая прочность, стойкость к перепадам температур, водонепроницаемость, антибактериальность и антистатичность, стойкость к образованию коррозии, плесени и грибка и пожаробезопасные свойства. Такое решение



*Рисунок 1. Эскизы малых архитектурных форм
Figure 1. Sketches of small architectural forms*

позволит не только создать (возродить) единый стиль и повысить комфортность общественных пространств городской среды атомградов, но также благоприятно отразится на имиджевой составляющей атомных городов, позволив объединить их в единый контур (по примеру городов «Золотого кольца России»), позволяющий даже просто

по парковой зоне или отдельному скверу идентифицировать атомград среди других городов, не имеющих отношения к Росатому.

⁵ Атомные города. – Союз «Атомные города». – Режим доступа: <https://atomgoroda.ru/> (дата обращения: 11.01.2025)

Заключение

На современном этапе развития экономических систем обеспечение конкурентоспособности отдельных территорий становится приоритетной задачей. Благоприятный имидж территориального образования отражает целостное представление о регионе, сложившееся в сознании общественности на основе личного опыта либо в результате информационного воздействия. Формирование положительного имиджа города – это сложный и многогранный процесс, который зависит от множества факторов. Важно понимать, что стремление занять лидирующие позиции по всем направлениям не является гарантией успеха. Гораздо важнее сосредоточиться на уникальных особенностях и достижениях города, которые могут привлечь инвесторов и туристов, удержать рабочую силу.

Атомграды пережили разные времена: быстрый рост и изобилие при Советском

Союзе, застой и кризисы в 1990-х и 2000-х, возрождение в 2010-х и 2020-х. Сейчас у них новый виток развития. Здесь модернизируют больницы, строят новые школы и улучшают городские пространства. В атомных городах живут открытые, эмпатичные и сплочённые люди. Они гордятся вкладом родных городов в историю страны и стараются улучшить качество жизни.

Можно отметить, что создание некоего уникального «фирменного образа», развитие единства общественных пространств атомградов за счет их оснащения одинаковыми комплектами малых архитектурных форм, по виду напоминающими объекты атомной энергетики, позволит повысить узнаваемость данных городов среди общественности, что в конечном счете положительно скажется на имидже территорий присутствия ГК «Росатом».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Костенников А. И. Маркетинговый механизм повышения инфраструктурной привлекательности территорий в контексте улучшения их социально-экономической динамики и инвестиционных условий. *Практический маркетинг*. 2024;6(324):69–76. <https://doi.org/10.24412/2071-3762-2024-6324-69-76>. EDN AASAXK.
2. Окрочкова А.В. Имидж муниципального образования как стратегический фактор эффективного менеджмента территорий. *Мичуринский агрономический вестник*. 2016;2:81–92. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36931095&ysclid=m87b413sir969735587> EDN VTSOPC.
3. Лесных Н.Ю. Имидж территорий как средство повышения инвестиционной привлекательности регионов в интересах достижения национальных целей Российской Федерации до 2030 года. Н. Ю. Лесных. Стратегии развития общества и экономики в новой реальности : *Сборник трудов четвертой международной научно-практической конференции*, Ростов-на-Дону, 20–21 октября 2022 года. Под редакцией Т.В. Игнатовой, Н.В. Брюхановой. Том Часть 1. Ростов-на-Дону: Южно-Российский институт управления – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (ЮРИУФ РАНХиГС), 2022;235–240. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49800194&ysclid=m87b86n3b092587254> EDN LGOHAC.
4. Колесов Р.В. Разработка методических подходов к оценке эффективности маркетинговой стратегии регионов России. Р. В. Колесов, Г. А. Бабаджанян, В. С. Невидина. *Практический маркетинг*. 2024;10(328):28–32. <https://doi.org/10.24412/2071-3762-2024-10328-28-32>. EDN WEWLVS.
5. Делидов А. Места публичной памяти в пространстве Г. Новоуральска. А. Делидов. *Молодежь и наука*. 2015;3:18. EDN ULVRLT.
6. Ухалина И.А. Проблемы развития атомграда в условиях формирования новой агломерации. И. А. Ухалина, Н. А. Ефименко, А. В. Анцибор. *Безопасность ядерной энергетики : Сборник тезисов по материалам докладов XX Международной научно-практической конференции*, Волгоград, 19–20 сентября 2024 года. Волгоград: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2024:122–124. Режим доступа: <https://openrepository.mephi.ru/entities/publication/20b30386-93d7-45df-b41a-35a7513c5d8a> EDN CEPJOM.
7. Камышанченко Е.Н. Формирование и развитие имиджа территории как маркетингового атрибута экономики современного региона. Е. Н. Камышанченко, С. А. Морусов. *Практический маркетинг*. 2020;12(286): 35–40. <https://doi.org/10.24412/2071-3762-2020-12-35-40>. EDN FGCGJV.
8. Константинова А.Г. Особенности формирования социально-культурной среды закрытых атомных городов Урала. А. Г. Константинова. *XVIII всероссийская научно-практическая конференция «Дни науки – 2018»*. 70 лет

ФГУП "ПО "МАЯК", Озёрск, 18–22 апреля 2018 года. Озёрск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2018;2:109–111. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37006734&ysclid=m87bcevaao248834985> EDN ADBQCU.

9. Степченко Т.С. Инвестиции как фактор развития региона (на примере Ростовской области). Т. С. Степченко, В. С. Матузков. *Прорывные экономические реформы в условиях риска и неопределенности: Международная научно-практическая конференция*, Челябинск, 10 сентября 2015 года. Челябинск: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2015. С. 111–114. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24067400&ysclid=m87bdheur5333737697> EDN UGRIQH.

10. Чесноков В.С. В.И. Вернадский – великий научный новатор и гуманист. *Век глобализации*. 2013;1(11):150–166. EDN PZUOYB. Режим доступа: [Век Глобализации №1 2013.pdf - Google Диск](#) (дата обращения: 09.01.2025).

11. Антипин Н.А.. Атомград. Южный Урал: от колесниц до мирного атома. Челябинск: Правительство Челябинской области, 2017. С. 108–113. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32562991&ysclid=m87biwrqd9823794414> EDN YRINDT.

13. Лазаренко В.А. Социальное развитие городов атомной электроэнергетики России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2019;2:20–30. Режим доступа: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019220-30>. EDN NZJDVB.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Попова Т.С. – концепция и качественная разработка исследования, написание текста статьи;

Задорожная Н.Д. – изучение теоретических источников по проблематике изучаемой проблемы для формирования методического аппарата анализа и оценки предметной области исследования;

Попов А.А. – изучение и систематизация информации на сайте атомных городов (<https://atomgoroda.ru/>) относительно проектов, осуществляемых ГК «Ростоатом»;

Воронов А.А. Вычитка работы, внесение корректив и уточнений.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Татьяна Сергеевна Попова, кандидат экономических наук, доцент, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

e-mail: TSPopova@mephi.ru

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

<https://orcid.org/0009-0001-7327-0592>

e-mail: nz41222@gmail.com

Андрей Александрович Попов, руководитель направления по инвестиционному развитию Филиала АО «АЭМтехнологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atom mash.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Popova T.S. – the concept and qualitative development of the study, writing the text of the article;

Zadorozhnaya N.D – the study of theoretical sources on the problems of the studied problem for the formation of a methodological apparatus for the analysis and evaluation of the subject area of research;

Popov A.A. – study and systematisation of information on the website of nuclear cities (<https://atomgoroda.ru/>) regarding projects implemented by Rostatom State Corporation;

Voronov A.A. – Proofreading, making corrections and clarifications.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Tatyna S. Popova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

e-mail: TSPopova@mephi.ru

Natalia D. Zadorozhnaya, Student, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0001-7327-0592>

e-mail: nz41222@gmail.com

Andrey A. Popov, Head of Investment Development, Atom mash the branch of JSC AEM-Technologies in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atom mash.ru

Александр Александрович Воронов, доктор экономических наук, профессор, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0001-8505-7345>
e-mail: voronov.a@mail.ru

Alexander A. Voronov, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0001-8505-7345>
e-mail: voronov.a@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 24.01.2025
После доработки / Revised 17.03.2025
Принята к публикации / Accepted 20.03.2025

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-2025-01-09>

EDN YINLOY

Оригинальная статья / Original paper



**Образовательная экосистема ВИТИ НИЯУ МИФИ
как базис его стратегического развития**

В.А. Руденко¹ , С.А. Томилин¹ , О.Ф. Цуверкалова¹  ,
С.В. Волгина¹ , А.В. Анцибор¹ , М.В. Головкин² 

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

² Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация
 OFTsuverkalova@mephi.ru

Аннотация. В статье представлен опыт применения экосистемного подхода в системе высшего образования при построении стратегии развития вуза, обеспечивающей подготовку кадров, обладающих компетенциями, необходимыми для достижения технологического суверенитета страны, готовых к быстрому обучению и адаптации в условиях изменчивой внешней среды, способных развивать технологии. Авторами представлены основные принципы реализации экосистемного подхода в практике Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ВИТИ НИЯУ МИФИ), а также определены ключевые результаты, полученные при применении экосистемного подхода на основе изменений в образовательном, научно-исследовательском, инновационном, организационно-управленческом процессах.

Ключевые слова: система образования, технологический суверенитет, образовательная экосистема, стратегия развития вуза, компетенции, стейкхолдеры, практико-ориентированное обучение, индивидуальная образовательная траектория, бесшовная адаптация выпускника, атомная отрасль.

Для цитирования: Руденко В.А., Томилин С.А., Цуверкалова О.Ф., Волгина С.В., Анцибор А.В., Головкин М.В. Образовательная экосистема ВИТИ НИЯУ МИФИ как базис его стратегического развития. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):85–95. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-09>

For citation: Rudenko V.A., Tomilin S.A., Tsuverkalova O.F., Volgina S.V., Antsibor A.V., Golovko M.V. Educational ecosystem of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI» as a basis for its strategic development. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):85–95. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-09>

**Educational ecosystem of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of
National Research Nuclear University «MEPhI» as a basis for its strategic development**

Valentina A. Rudenko¹ , Sergey A. Tomilin¹ , Olga F. Tsuverkalova¹  ,
Svetlana V. Volgina¹ , Anna V. Antsibor¹ , Maria V. Golovko² 

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

² I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation
 OFTsuverkalova@mephi.ru

Abstract. The article presents the experience of applying the ecosystem approach in the higher education system when building a university development strategy that ensures the training of personnel with the competencies necessary to achieve the country's technological sovereignty, ready for rapid learning and adaptation in a changing external environment, capable of developing technologies. The authors present the basic principles of implementing the ecosystem approach in practice of National Research Nuclear University «MEPhI», and also identify the key results obtained in the application of the ecosystem approach based on changes in educational, research, innovation, organizational and managerial processes.

Keywords: education system, technological sovereignty, educational ecosystem, university development strategy, competencies, stakeholders, practice-oriented learning, individual educational trajectory, seamless adaptation of graduates, nuclear industry.

Введение

Глобальные вызовы и ключевые тренды, сложившиеся в последние годы в мировой экономике, оказывают значительное влияние на развитие системы образования. В первую очередь это вызвано изменениями основных трендов на рынке труда, что обусловлено стремительным развитием технологий, в том числе цифровых. Старые профессии исчезают или трансформируются, одновременно с этим появляются новые профессии, требующие иных навыков и знаний. Традиционная «индустриальная» система образования оказывается недостаточно гибкой, чтобы оперативно реагировать на эти изменения. Поэтому одной из главных задач становится подготовка специалистов, готовых к быстрому обучению и адаптации в условиях динамично изменяющейся внешней среды.

В российских реалиях глобальные вызовы усугубляются необходимостью обеспечения технологического суверенитета страны, что ставит перед образованием ряд дополнительных задач, поскольку именно образовательные учреждения играют ключевую роль в подготовке кадров, способных развивать технологии и поддерживать технологический прогресс страны.

Перед российскими вузами сегодня стоят следующие задачи:

1. *Подготовка специалистов с необходимыми компетенциями.* Система образования должна оперативно реагировать на изменения в технологиях и адаптироваться к новым требованиям рынка труда, что требует постоянного обновления образовательных программ и методик обучения. Особенно важно готовить кадры для наукоемких и высокотехнологичных областей.

2. *Развитие исследовательской деятельности.* Для поддержания технологического суверенитета необходимы научные исследования и разработки. Образовательные учреждения должны создавать условия для проведения научных исследований, обеспечивать доступ к современным лабораториям и оборудованию, а также стимулировать студентов и преподавателей к участию в инновационных проектах. Важно также наладить сотрудничество между университетами, научными институтами и промышленностью, чтобы результаты исследований могли быстро внедряться в производство.

3. *Формирование культуры инновационного мышления.* Важно не только передавать знания, но и формировать у студентов способность к критическому мышлению, креативному подходу и инновационному решению проблем. Это требует пересмотра традиционных методов обучения и внедрения новых подходов, таких как проектное обучение, кейс-методика и междисциплинарные проекты.

4. *Раннее выявление талантов.* Талантливые студенты и молодые ученые являются ключевым ресурсом для развития технологий. Система образования должна создавать условия для выявления и поддержки одаренных студентов, предоставляя им возможности для дальнейшего профессионального роста и научной карьеры.

Общие положения

Решение поставленных задач может быть обеспечено только на основе радикальной перестройки системы образования. Акценты образования смещаются от передачи знаний к формированию компетенций. Компетенции, необходимые для технологического су-

веренитета, охватывают широкий спектр знаний, навыков и способностей кадрового ресурса реального сектора экономики, которые позволяют стране самостоятельно разрабатывать, производить и обслуживать современные технологии. Эти компетенции включают как технические, так и управленческие аспекты. Значительное внимание уделяется развитию «мягких навыков» (soft skills), необходимых для успешной адаптации на рынке труда. К одним из важнейших можно отнести такие навыки, как коммуникация, креативность, работа в команде, адаптивность, критическое мышление, стрессоустойчивость, способность к самостоятельному развитию. Традиционные модели образования уступают место персонализированному подходу, когда для каждого обучающегося формируется индивидуальная образовательная траектория, соответствующая его интересам, потребностям и уровню подготовки, а также запросам работодателей.

Как следствие, университеты вынуждены менять подходы к организации образовательного процесса и формировать новые модели обучения, в значительной степени ориентированные на внешних стейкхолдеров, в первую очередь, работодателей и местные сообщества [1]. Усиление роли взаимосвязей университета со множеством заинтересованных сторон нашло отражение в концепции «образовательной экосистемы», возникшей в начале 2000-х гг. и активно внедряемой не только в нашей стране, но и во всем мире. Образовательная экосистема может рассматриваться как «совокупность активов и интересов всех заинтересованных сторон (преподавательского состава, студентов, отрасли промышленности, сообществ и отдельных лиц в каждой из этих категорий), цель которой – достижение синергетических результатов, которые выгодны всем»¹ [2]. Взаимовыгодный подход находит свое отражение в двустороннем процессе обмена:

– для университета привлечение внешних стейкхолдеров позволяет своевременно

обновлять перечень образовательных программ, методик обучения и формируемых у студентов компетенций за счет ориентации на актуальные тренды развития экономики, тем самым повышая востребованность выпускников на рынке труда;

– работодатели получают кадры с необходимыми компетенциями, тем самым сокращая адаптационный период выпускников на предприятиях и обеспечивая повышение эффективности производства.

В результате образовательная экосистема представляет собой гибкую и адаптивную среду, обеспечивающую за счет активного взаимодействия участников всестороннее развитие обучающихся¹. Результатом такого взаимодействия является активное вовлечение образовательных учреждений в инновационную и предпринимательскую деятельность (рис. 1), тем самым способствуя решению задач обеспечения технологического суверенитета.

Основными характеристиками образовательной экосистемы, отличающей ее от традиционной системы образования, являются многосторонность, сотворчество и целенаправленность¹ (рис. 2).

Многосторонность проявляется в расширении числа субъектов, прямо или косвенно участвующих в организации образовательного процесса. Сотворчество подразумевает активное участие всех заинтересованных сторон в образовательной деятельности, тем самым обеспечивая ориентацию образования на решение актуальных задач экономики. Целенаправленность находит отражение в иерархии дерева целей, начиная от личного роста обучающихся до обеспечения отраслевого и регионального развития.

Результаты и обсуждения

Рассмотрим реализацию основных принципов экосистемного подхода в ВИТИ НИЯУ МИФИ.

Прежде всего, отметим, что тесное взаимодействие со стейкхолдерами обусловлено

¹ Образовательные экосистемы: возникающая практика для будущего образования. Режим доступа: https://ftp.skolkovo.ru/web_team/ExEd/file/obrazovatelnye_ekosistemy_doklad.pdf (дата обращения: 28.12.2024)

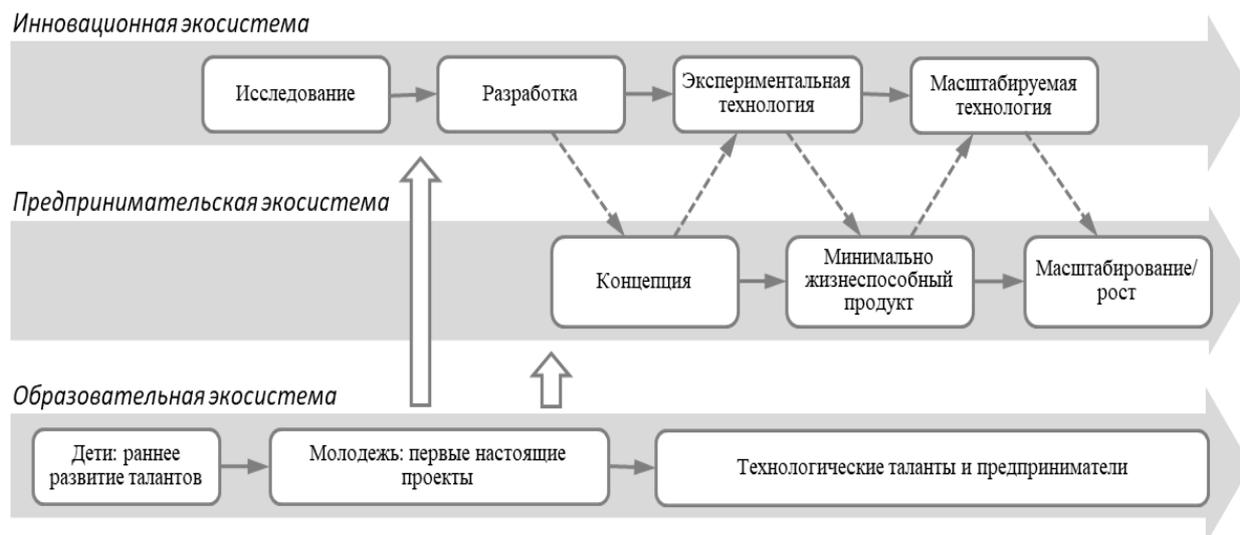


Рисунок 1. Роль образовательной экосистемы в развитии инноваций и предпринимательства
Figure 1. The role of the educational ecosystem in the development of innovation and entrepreneurship

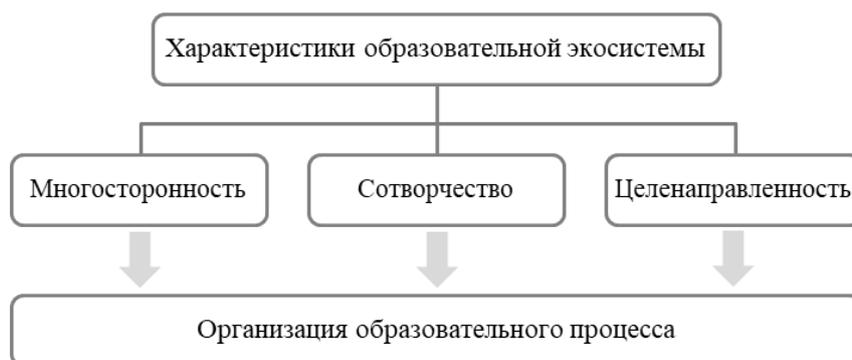


Рисунок 2. Ключевые характеристики образовательной экосистемы
Figure 2. Key characteristics of the educational ecosystem

уже самой историей вуза, который создавался как база подготовки кадров для строящегося завода «Атоммаш», а затем и для Ростовской атомной станции. На протяжении всего времени институт оперативно реагировал на изменения в кадровой потребности города и региона, открывая новые специальности и направления подготовки, востребованные на предприятиях. Сегодня среди ключевых партнеров ВИТИ НИЯУ МИФИ предприятия четырех дивизионов ГК «Росатом», а также Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения. Стратегическое партнерство создает вузу условия для укрепления материально-технической и технологической базы, повышения и поддержания высокой

квалификации преподавателей и как результат – обеспечивать высокое качество подготовки выпускников и конкурентоспособность института на рынке образования.

К преимуществам стратегического партнерства ВИТИ НИЯУ МИФИ и предприятий-работодателей, прежде всего, можно отнести:

– эффективную консолидацию ресурсов (кадровый потенциал, производственные площадки, учебно-тренировочные подразделения, полномасштабные тренажеры и оборудование предприятий и т.д.) для дуального обучения молодых специалистов, реализации индивидуальных образовательных траекторий, с учетом потребностей предприятий-заказчиков с целью удовлетворения запросов

работодателей и сокращения периода адаптации выпускников на рабочем месте;

– обеспечение тесной интеграции с предприятиями дивизионов ГК «Росатом» и региона в вопросах подготовки специалистов, что демонстрирует реализация модели непрерывной подготовки молодых специалистов, включающая среднее профессиональное, высшее и дополнительное профессиональное образование. Разработанная ВИТИ НИЯУ МИФИ модель непрерывной подготовки, в 2022 году стала победителем в проводимом АНО «Агентство стратегических инициатив» конкурсе «Передовые технологии подготовки профессиональных кадров»;

– обеспечена актуальность и востребованность разрабатываемых и реализуемых образовательных программ, обусловленная высокой степенью осведомленности преподавателей и сотрудников вуза о задачах и перспективах развития отрасли, а также регулярным прохождением стажировок и повышения квалификации на отраслевых предприятиях. Разработка образовательных программ и их актуализация проходит обязательное согласование и рецензирование с предприятиями-заказчиками кадров. К проведению занятий, руководству курсовыми и выпускными квалификационными работами, производственными практиками, участием в государственной итоговой аттестации активно привлекаются ведущие специалисты базовых предприятий, тем самым обеспечивая обратную связь между производством и образованием;

– в ВИТИ НИЯУ МИФИ практикуется проведение профессионально-общественной аккредитации реализуемых образовательных программ с привлечением экспертов ведущих отраслевых предприятий. На сегодняшний день профессионально-общественную аккредитацию имеют 6 образовательных программ ВО и 3 образовательных программы СПО.

Решение задачи обеспечения технологического суверенитета требует усиления практико-ориентированной составляющей образовательного процесса, что достигается посредством увеличения доли практической подготовки, реализуемой на площадках от-

раслевых предприятий. В ВИТИ НИЯУ МИФИ широко применяется формирование индивидуальных образовательных траекторий для студентов старших курсов, позволяющих совмещать обучение в вузе с производственной деятельностью. Индивидуализация обучения позволяет студентам получить профессиональные навыки, востребованные на конкретном рабочем месте, выполнить и защитить выпускную квалификационную работу по тематике, направленной на решение актуальных производственных задач, а также сдать экзамены на должность, не дожидаясь окончания обучения. Такой подход позволяет обеспечить бесшовную адаптацию выпускника на рабочем месте.

Практико-ориентированная подготовка выпускников ВИТИ НИЯУ МИФИ обеспечивается также за счет участия студентов в вузовских, региональных и отраслевых конкурсах профессионального мастерства по таким компетенциям, как: «Сварочные технологии», «Электромонтаж», «Технологические системы энергетических объектов», «Машинное обучение и большие данные», «Цифровая трансформация», «Веб-разработка», «Сметное дело», «Охрана труда» и др. Неотъемлемой частью подготовки специалистов СПО является проведение демонстрационного экзамена (ДЭ) как составной части итоговой государственной аттестации [3]. В рамках пилотного проекта была апробирована практика проведения ДЭ по программам ВО по направлениям подготовки «Строительство», «Информационные системы и технологии» и специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг». Качество подготовки выпускников обеспечивается не только проведением ДЭ, но и обязательным прохождением выпускниками независимой оценки квалификации в Центре оценки и сертификации квалификаций в области атомной энергетики.

ВИТИ НИЯУ МИФИ активно участвует в программах международной интеграции и экспорта российского образования. В 2015 г. на основе консолидации ресурсов института и предприятий-партнеров был создан Ресурсный центр ГК «Росатом» – НИЯУ

МИФИ, обеспечивающий практико-ориентированную подготовку иностранных и российских студентов консорциума опорных вузов ГК «Росатом». Обучение в Ресурсном центре осуществляется на реальном действующем оборудовании и полномасштабных тренажерах, расположенных на производственных площадках предприятий атомной отрасли, а также предприятий Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения.

На базе института в 2024 г. создан и развивается Научно-образовательный центр подготовки эксплуатационного персонала АЭС с реакторами ВВЭР и кадров для атомного машиностроения и строительства, включающий:

- *цифровой проектно-технологический полигон*, в задачи которого входят разработка, внедрение и использование цифровых решений в производственных процессах атомной отрасли;

- *кластер передовых машиностроительных технологий атомной отрасли*, предназначенный для подготовки выпускников к решению задач обеспечения технологического суверенитета и лидерства в области машиностроения;

- *фабрика процессов по подготовке эксплуатационного и ремонтного персонала*

АЭС, созданная для отработки навыков, направленных на повышение безопасности эксплуатации и качества ремонта оборудования АЭС;

- *учебно-исследовательский комплекс охраны труда, ядерной безопасности и радиационного контроля*, предназначенный для практической подготовки по основным процессам обеспечения комплексной безопасности АЭС;

- *площадка практико-ориентированного обучения технологическим процессам строительства объектов атомной отрасли*, обеспечивающая формирование компетенций для реализации всех этапов жизненного цикла объектов атомной отрасли: от проектирования до утилизации.

Целью создания Научно-образовательного центра является повышение качества подготовки выпускников, востребованных на предприятиях атомной отрасли и региона, их бесшовная адаптация на производстве, расширение направлений научно-исследовательской деятельности в интересах предприятий ГК «Росатом» и развитие актуальных компетенций их работников.

Успешная работа ВИТИ НИЯУ МИФИ в сфере подготовки кадров подтверждается результатами трудоустройства выпускников (рис. 3).

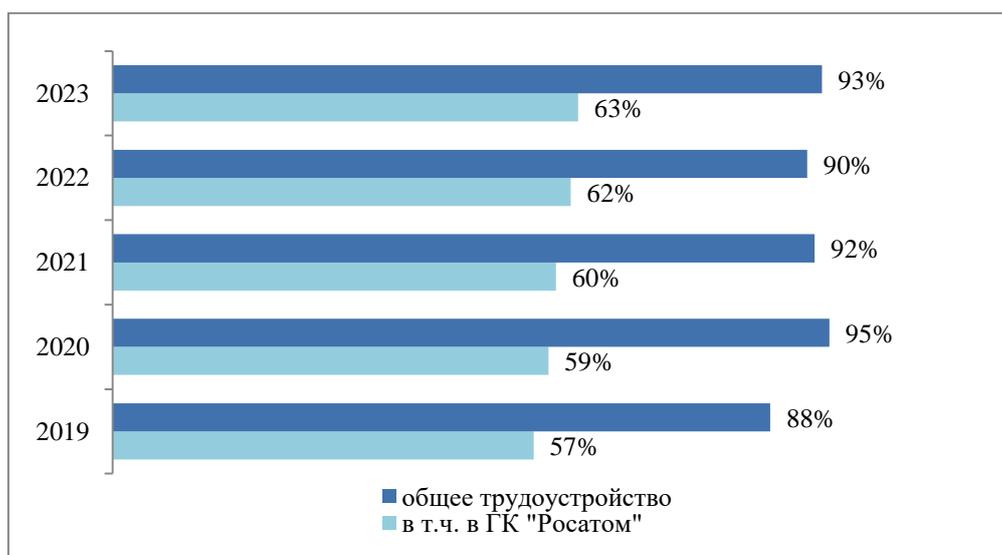


Рисунок 3. Динамика трудоустройства выпускников ВИТИ НИЯУ МИФИ

Figure 3. Dynamics of employment of graduates of Volgodonk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»

Ключевая роль в организации и осуществлении научной и инновационной деятельности принадлежит научно-исследовательскому институту атомного энергетического машиностроения ВИТИ НИЯУ МИФИ, который является структурным подразделением вуза. Основные научные направления НИИ АЭМ определяются стратегическим вектором развития ГК «Росатом» [4] и напрямую связаны с выполнением исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) для ключевых предприятий отрасли. Целями проводимых НИОКР являются снижение издержек на обслуживание оборудования АЭС во время планово-предупредительного ремонта (ППР) при условии сохранения эксплуатационной надежности и сокращения длительности обслуживания и ремонта оборудования АЭС с соответствующим сокращением сроков ППР. Проводимые исследования направлены, главным образом, на информационно-диагностическое сопровождение эксплуатации оборудования атомных станций, включающее контроль технического состояния, комплексную диагностику оборудования и оценку его остаточного ресурса. Перспективными направлениями является разработка и поставка обучающих тренажеров с использованием VR/AR технологий для подготовки оперативного персонала АЭС; создание АСУ ТП будущего (Умной АСУ ТП) с применением искусственного интеллекта, что позволит перейти к формированию цифровой модели или цифрового двойника энергоблока.

С целью обмена актуальными результатами исследований в ВИТИ НИЯУ МИФИ ежегодно проводится Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики», собирающая представителей научно-образовательного сообщества, специалистов предприятий дивизионов ГК «Росатом», руководителей и специалистов органов государственной и муниципальной власти. Основной целью конференции является обмен опытом и обсуждение актуальных вопросов в области обеспечения безопасности АЭС на различных этапах жизненного цикла с учетом социокультурных, экономических и информационных аспектов, а также разработки и внедрения

передовых технологий атомной энергетики и подготовки кадров для реализации стратегических целей ГК «Росатом», направленных на строительство и эксплуатацию энергоблоков как в России, так и за рубежом.

Для публикации результатов научных исследований издается журнал «Глобальная ядерная безопасность», входящий в перечень ВАК и представляющий авторитетную информацию о современных направлениях исследований в областях, связанных с ядерной инженерией, эксплуатацией АЭС, а также с социально-экономическими аспектами развития территорий размещения АЭС. Публикации журнала охватывают все аспекты глобальной инфраструктуры ядерной безопасности, а также актуальные вопросы подготовки кадров для ядерных энергетических, научно-технических комплексов и комплексов по обеспечению радиационной безопасности.

К научно-исследовательской деятельности активно привлекаются студенты – члены студенческого научного общества [5]. В институте практикуется участие студентов в работах, проводимых НИИ АЭМ с последующим использованием полученных результатов в курсовом и дипломном проектировании. Работы, выполненные по результатам студенческих научных исследований, ежегодно обеспечивают призовые места и победу во Всероссийском конкурсе выпускных квалификационных работ, Открытом конкурсе на лучший научно-технический доклад среди молодых работников и студентов ключевых вузов Росатома. Команды студентов ВИТИ НИЯУ МИФИ принимают активное участие в образовательных программах Акселератора социальных и технологических проектов НИЯУ МИФИ и ГК «Росатома», направленных на самостоятельную разработку и реализацию проектов, способных решать актуальные проблемы общества и улучшать качество жизни населения, а также оказание помощи выхода на рынок и коммерциализации разработки. В вузе ежегодно проводится Всероссийская научно-практическая молодежная конференция «Студенческая научная весна», по результатам которой публикуются сборники тезисов, а лучшие работы участвуют в кон-

курсе стендовых докладов Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики».

Высокая мотивированность студентов ВИТИ НИЯУ МИФИ в значительной степени обусловлена проводимой в вузе работой по раннему выявлению талантов. ВИТИ НИЯУ МИФИ на протяжении многих лет разрабатывает и реализует эффективные профориентационные проекты [6,7], которые позволяют ежегодно наращивать показатели по приему обучающихся: количество студентов по программам ВО и СПО, средний балл ЕГЭ и средний балл аттестата (для программ СПО). В их числе:

– авторские профориентационные проекты («AtomCamp» – проектные и инженерные образовательные интенсивы для школьников; проект «Стань студентом на один день»; Летняя научно-техническая детская школа «Юные атомщики»; ежегодный физический марафон для школьников города и др.);

– интеграция новых регионов в образовательную среду («Каникулы в Атомграде» для школьников и студентов СПО в рамках проекта «Университетские смены»; дни открытых дверей, профориентационные туры и подготовительные школы для абитуриентов из новых регионов России);

– лучшие практики предвузовской подготовки (развитие Инженерно-технологической гимназии «Юнона» при ВИТИ НИЯУ МИФИ; обучение школьников по программам Центра довузовской подготовки; профориентационные пробы, тестирования, тренинги и мастер-классы).

Учитывая повышающуюся роль необходимых для успешной адаптации на рынке труда «мягких навыков» (soft skills), в ВИТИ НИЯУ МИФИ уделяется особое внимание развитию деловых и управленческих компетенций студентов, формированию у них осознанного стремления к саморазвитию и личностному росту, следованию корпоративным ценностям и трендам [8]. Для систематизации этой работы в феврале 2024 г. на площадке ВИТИ НИЯУ МИФИ было открыто представительство соответствующего Центра деловых и управленческих компетенций НИЯУ МИФИ. Это позволило использовать

дополнительные информационно-методические ресурсы, в частности, разработанные и размещенные на президентской платформе «Россия – страна возможностей». Обучение в Центре компетенций проходят практически все студенты очной формы обучения. На завершающем этапе проводится комплексная оценка сформированности деловых и управленческих компетенций, что подтверждается соответствующим паспортом компетенций. Паспорт компетенций наряду с сертификатом независимой оценки профессиональных квалификаций является еще одним маркером готовности выпускников к включению в производственную деятельность предприятий атомной отрасли.

Заключение

В заключении необходимо отметить, что применение экосистемного подхода в системе высшего образования является одним из основных трендов стратегического развития современного вуза. Сегодня вуз выступает основной образовательной единицей, являющейся базой для создания инноваций и обеспечивающей подготовку высококвалифицированных кадров, обладающих компетенциями, необходимыми для обеспечения технологического суверенитета нашей страны, а внедрение экосистемного подхода во многом способствует повышению эффективности данного процесса. Ключевым моментом такой системы выступает взаимовыгодное сотрудничество и обоюдный интерес, который способен принести положительный эффект как вузу, так и его стейкхолдерам.

Нами была рассмотрена образовательная экосистема вуза, способная быстро адаптироваться к изменениям внешних условий, обеспечивающая повышение эффективности образовательной, инновационной и предпринимательской деятельности внутри вуза, путем взаимодействия с факторами внешней среды. Применение экосистемного подхода в системе образования способствует наращиванию уровня научно-исследовательской и инновационной деятельности, росту числа студенческих проектов и соответствие образовательного процесса новым тенденциям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Изотова А.Г., Гаврилюк Е.С. Экосистемный подход как новый тренд развития высшего образования. *Вопросы инновационной экономики*. 2022;12(2):211–226. <https://doi.org/10.18334/vinec.12.2.114869>
Izotova A.G., Gavriilyuk E.S. Ecosystem approach as a new trend in the development of higher education. *Russian journal of innovation economics*. 2022;12(2):211–226. <https://doi.org/10.18334/vinec.12.2.114869>
2. Ковалева Т.М. Экосистемный подход в образовании: начало пути. Непрерывное образование в контексте будущего. Сборник научных статей по материалам IV Международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 25–31. EDN: MLLKDC. Режим доступа: <https://elibrary.ru/MLLKDC> (дата обращения: 20.01.2024).
3. Руденко В.А., Томилин С.А., Анцибор А.В., Доблер Г.А., Василенко Н.П. Демонстрационный экзамен в ВИТИ НИЯУ МИФИ: новый подход к итоговой аттестации выпускников. Безопасность ядерной энергетики. Тезисы докладов XIV Международной научно-практической конференции. Волгодонск, 2018. С. 127–130. Режим доступа: https://nps.viti-mephi.ru/files/page/file/viti_sbornik_byae_2018.pdf (дата обращения: 20.01.2024).
4. Руденко В.А., Головкин М.В., Томилин С.А., Цуверкалова О.Ф. Синхронизация задач отраслевых вузов со стратегией развития ГК «Росатом» как фактор обеспечения безопасности атомной энергетики. *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;1(34):98–106. <https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-11>
Rudenko V.A., Golovko M.V., Tomilin S.A., Tsuverkalova O.F. Synchronization of industrial higher education institution objectives with strategy of «Rosatom» State Corporation development as nuclear energy safety factor. *Global nuclear safety*. 2020;(1):98–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-11>
5. Лобковская Н.И., Железнякова А.В., Недорубов А.Н. К вопросу об инновационном потенциале студентов отраслевых вузов-партнеров ГК «Росатом» *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;(1):116–124. <https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-13>
Lobkovskaya N.I., Zheleznyakova A.V., Nedorubov A.N. Issue of innovative potential of students of industrial universities – «Rosatom» State Corporation partners. *Global nuclear safety*. 2020;(1):116–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-13>
6. Руденко В.А., Томилин С.А., Железнякова А.В., Лобковская Н.И. Инновационная модель профориентационной кооперации стейкхолдеров атомной отрасли на базе Волгодонского инженерно-технического института – филиала национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;(3):73–85. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-07>
Rudenko V.A., Tomilin S.A., Zheleznyakova A.V., Lobkovskaya N.I. Innovative Model of Vocational Cooperation of Stakeholders in the Nuclear Industry on the Basis of Volgodonsk Engineering Technical Institute the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI». *Global nuclear safety*. 2022;(3):73–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-07>
7. Лобковская Н.И., Томилин С.А., Железнякова А.В. Эффективные практики профориентационного сотрудничества заинтересованных сторон инженерного образования. Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании. Сборник трудов V Международной научно-практической конференции. Балаково, 2023. С. 226–231. Режим доступа: <https://biti.mephi.ru/wp-content/uploads/2023/07/%D0%A2%D0%BE%D0%BC-II-3.pdf> (дата обращения: 04.01.2025).
8. 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. Importance of supraprofessional competences of technical university students in the Rosatom State Corporation's sectoral personnel reserve formation. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):101–108. (In Russ.). EDN: YKHXXQ. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-09>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Руденко В.А. – концепция и качественная разработка исследования;
Томилин С.А. – постановка задачи, руководство научно-исследовательской работой и проверка результатов;
Цуверкалова О.Ф. – изучение и систематизация информации по исследуемой проблеме, написание текста статьи;
Волгина С.В. – изучение теоретических источников по проблематике изучаемой проблемы, редактирование текста статьи;
Анцибор А.В. – формирование методического аппарата анализа и оценка предметной области исследова-

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Rudenko V. A. – concept and qualitative development of the research;
Tomilin S.A. – setting the task, managing the research work and checking the results;
Tsuverkalova O.F. – studying and systematizing information on the problem under study, writing the text of the article;
Volgina S.V. – study of theoretical sources on the issues under study, editing the text of the article;
Antsibor A.V. – formation of a methodological apparatus for analysis and assessment of the subject area of

ния, формулирование обобщающих выводов;
Головко М.В. – анализ основных направлений стратегического развития ВИТИ НИЯУ МИФИ.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Валентина Анатольевна Руденко, доктор социологических наук, заведующий кафедрой экономики и социально-гуманитарных дисциплин, руководитель Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

Сергей Алексеевич Томилин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, заместитель руководителя, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Ольга Феликсовна Цуверкалова, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-6304-4498>

e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

Волгина Светлана Васильевна, кандидат экономических наук, доцент, заместитель руководителя, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-3425-8627>

e-mail: SVVolgina@mephi.ru

Анна Васильевна Анцибор, кандидат экономических наук, доцент, заместитель руководителя, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-1192-4554>

e-mail: AVAntsibor@mephi.ru

research, formulation of general conclusions;

Golovko M.V. – analysis of the main directions of strategic development of the Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Valentina A. Rudenko, Dr. Sci. (Soc.), Head of the Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Deputy Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

Sergey A. Tomilin, Cand. Sci. (Eng.), Head and Associate Professor Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Deputy Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Olga F. Tsuverkalova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Head of the Department of Information and Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-6304-4498>

e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

Svetlana V. Volgina, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Deputy Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-3425-8627>

e-mail: SVVolgina@mephi.ru

Anna V. Antsibor, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Deputy Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-1192-4554>

e-mail: AVAntsibor@mephi.ru

Мария Владимировна Головки, доктор экономических наук, профессор, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация.
<http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>
e-mail: golovko178@mail.ru

Maria V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), Professor, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation.
<http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>
e-mail: golovko178@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 09.01.2025

После доработки / Revision 24.02.2025

Принята к публикации / Accepted 27.02.2025

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Анцибор А.В.	85
Беденко С.В.	5
Беляков А.А.	33
Бодров А.И.	33
Варзанов А.В.	33
Власкин Г.Н.	5
Волгина С.В.	85
Волков Н.С.	33
Воронов А.А.	74
Головко М.В.	85
Дембицкий А.Е.	60
Задорожня Н.Д.	74
Костикова М.М.	60
Кравец С.Б.	60
Кувшинова Е.В.	24
Кузин С.А.	60
Махмуд К.А.	24
Поваров П.В.	67
Полозков С.Д.	5
Попов А.А.	74
Попова Т.С.	74
Правосуд С.С.	40
Припачкин Д.А.	17
Пыльцова Д.О.	24
Руденко В.А.	85
Садофьев И.Д.	17
Смолин А.Ю.	60
Сорокин А.А.	33
Ташлыкков О.Л.	24
Томилин С.А.	85
Тхьонг Т.В.	24
Филатов В.В.	33
Цуверкалова О.Ф.	85

AUTHOR INDEX

Antsibor A.V.	85
Bedenko S.V.	5
Belyakov A.A.	33
Bodrov A.I.	33
Dembitskiy A.E.	60
Filatov V.V.	33
Golovko M.V.	85
Kostikova M.M.	60
Kravets S.B.	60
Kuvshinova E.V.	24
Kuzin S.A.	60
Mahmud K.A.	24
Polozkov S.D.	5
Popov A.A.	74
Popova T.S.	74
Povarov P.V.	67
Pravosud S.S.	40
Pripachkin D.A.	17
Pyltsova D.O.	24
Rudenko V.A.	85
Sadofev I.D.	17
Smolin A.Y.	60
Sorokin A.A.	33
Tashlykov O.L.	24
Thuong TaVan	24
Tomilin S.A.	85
Tsuverkalova O.F.	85
Varzanov A.V.	33
Vlaskin G.N.	5
Volgina S.V.	85
Volkov N.S.	33
Voronov A.A.	74
Zadorozhnaya N.D.	74

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
