

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPHI

# GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2022, 4(45)

Founded in November, 2011

The subscription index is 10647 in the catalogue «Press of Russia»

Quarterly

ISSN 2305-414X, reg. № FS77-47155, November, 3 2011

Web-site: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>

## **Editor-in-Chief:**

*M.N. Strikhanov*, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)

## **Editorial Staff:**

*M.N. Strikhanov*, Editor-in-Chief, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)

*V.A. Rudenko*, Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Sociology, Professor (*Russia*)

*V.P. Povarov*, Doctor of Technical sciences (*Russia*)

*M.K. Skakov*, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Kazakhstan*)

*V.E. Shukshunov*, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

*A.V. Chernov*, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

*A.P. Elokhin*, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

*Y.I. Pimshin*, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

*V.V. Krivin*, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

*V.I. Ratushny*, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)

*A.A. Salnikov*, PhD Technical sciences (*Russia*)

*S.E. Gook*, PhD Technical Science (*Germany*)

*M.V. Golovko*, Doctor of Economic sciences (*Russia*)

*N.M. Fomenko*, Doctor of Economic sciences (*Russia*)

*A.N. Shilin*, Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)

## **Founder:**

National Research Nuclear University MEPHI

Editorial address:

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia

Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia

telephone: (8639)222717, e-mail: [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru)

Press address:

Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia.

**Moscow**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

# ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2022, 4(45)

Журнал основан в ноябре 2011 г.  
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 10647  
Выходит 4 раза в год, ISSN 2305-414X  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г.

**Журнал включен в перечень ВАК РФ (№906)**

**Группы научных специальностей:**

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

**Web-site: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>**

## **Главный редактор:**

*М.Н. Стриханов*, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)

## **Редакционная коллегия:**

*М.Н. Стриханов*, главный редактор, д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)

*В.А. Руденко*, заместитель главного редактора, д-р соц. наук, проф. (Россия)

*В.П. Поваров*, д-р техн. наук, проф. (Россия)

*М.К. Скаков*, д-р физ.-мат. наук, проф. (Казахстан)

*В.Е. Шукинунов*, д-р техн. наук, проф. (Россия)

*А.В. Чернов*, д-р техн. наук, проф. (Россия)

*А.П. Елохин*, д-р техн. наук, проф. (Россия)

*Ю.И. Пимишин*, д-р техн. наук, проф. (Россия)

*В.В. Кривин*, д-р техн. наук, проф. (Россия)

*В.И. Ратушный*, д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)

*А.А. Сальников*, к-т техн. наук (Россия)

*С.Э. Гоок*, к-т техн. наук (Германия)

*М.В. Головки*, д-р экон. наук, проф. (Россия)

*Н.М. Фоменко*, д-р экон. наук, проф. (Россия)

*А.Н. Шилин*, д-р техн. наук, проф. (Россия)

## **Учредитель:**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес редакции: 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31;  
347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94,  
тел. (8639) 222717, e-mail: [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru)

Адрес типографии: 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94.

**Москва**

# CONTENTS

---

2022, 4(45)

---

## NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

- Biological and Chemical Monitoring of Rostov NPP as Effective Tool to Prevent Biological Disturbances in the Circulation and Technical Water Supply Systems  
*O.I. Gorskaya*.....6
- Substantiating the Need to Cover Atomic Energy Objects from Air Strikes  
*O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze*.....15

---

## DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

- Test Results of Variance Reduction Techniques Applied to Deep Penetration Problem  
*E.V. Bogdanova, G.V. Tikhomirov*.....25
- Intelligent Relay Protection System for Overhead Lines in Electrical Networks with Low Earth Fault Currents  
*A.N. Shilin, P.V. Dikarev, S.S. Dementyev*.....40

---

## OPERATION OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

- Effect of the Burnable Absorber (Gd) on the Multiplying Coefficient ( $K_{\infty}$ ) in the Process of Fuel Burnup for Full-Scale and Poly Cells Models for the WWER Reactor  
*A.S.K. Rahman, M.A. Uvakin* .....54
- Forecasting the Operation of Sealing Joints of Transport Locks of WWER-1000 and WWER-1200 Power Units in Operational Modes  
*S.A. Kuzin, S.B. Kravets, E.V. Parygin, V.V. Krasnokutsky*.....61
- Influence of Fuel Temperature Distribution Dependence on Neutron-Physical Characteristics OF Nuclear Core with WWER-1000 (1200)  
*R.T.Al. Malkawi, L.J. Zaidan*.....69

---

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

- Safety Culture Education and Training in the Republic of Belarus  
*T.N. Korbut, A.V. Kuzmin, O.A. Nautsyk, D.A. Kuzmuk*.....79
- Methodological Foundations of Development and Implementation of Corporate Standards of Production Safety Culture of Industrial Enterprises  
*I.E. Lyskova*.....87
- Role of University Strategic Initiatives in Service and Infrastructure Model to Develop the City of State Corporation "Rosatom" Presence Using VETI NRNU MEPhI as an Example.  
*V.A. Rudenko, N.F. Privalova, S.A. Tomilin, T.S. Popova*.....101
- 
- Author Index of vol. 4, 2022 .....117
-

# СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4(45), 2022

## ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Биолого-химический мониторинг Ростовской АЭС как эффективный инструмент предупреждения биологических помех в системах циркуляционного и технического водоснабжения  
*Горская О.И.*..... 6
- К вопросу обоснования необходимости прикрытия объектов использования атомной энергии от ударов с воздуха  
*Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р.*..... 15

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

- Результаты тестирования методов понижения дисперсии в задаче на глубокое прохождение излучения  
*Богданова Е.В., Тихомиров Г.В.*..... 25
- Интеллектуальная система релейной защиты воздушных линий в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю  
*Шилин А.Н., Дикарев П.В., Дементьев С.С.*..... 40

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Влияние выгорающего поглотителя (Gd) на коэффициент размножения ( $k_{\infty}$ ) в процессе выгорания топлива для полномасштабных и полиячеечных моделей для реактора ВВЭР  
*Рахман А.С.К., Увакин М.А.* ..... 54
- Прогнозирование работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах  
*Кузин С.А., Кравец С.Б., Парыгин Е.В., Краснокутский В.В.*..... 61
- Влияние зависимости распределения температуры топлива на нейтронно-физические характеристики активной зоны с ВВЭР-1000 (1200)  
*Малкави Р.Т.А., Заидан Л.Д.*..... 69

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

- Организация обучения по культуре безопасности в Республике Беларусь  
*Корбут Т.Н., Кузьмин А.В., Науцик О.А., Кузьмук Д.А.*..... 79
- Методологические основы разработки и внедрения корпоративных стандартов культуры производственной безопасности предприятий атомной промышленности  
*Лыскова И.Е.*..... 87
- Роль стратегических инициатив вуза в сервисно-инфраструктурной модели развития города присутствия Госкорпорации «Росатом» на примере ВИТИ НИЯУ ВИТИ  
*Руденко В.А., Привалова Н.Ф., Томилин С.А., Попова Т.С.*..... 101
- Авторский указатель номера 4(45), 2022..... 117

## ОТ РЕДАКЦИИ

*Национальному исследовательскому ядерному университету «МИФИ» – 80 лет! Созданный как Московский механический институт боеприпасов, он явил собой новую эру в образовании – ядерную, и к 2030 году призван стать, по словам Генерального директора Госкорпорации «Росатом» Алексея Лихачева, «планетарным лидером ядерного образования».*

*Легендарный вуз с богатейшей историей, МИФИ развивался, сохраняя верность лучшим академическим традициям и своему девизу «Дорогу осилит идущий». В его славную историческую летопись золотыми буквами вписаны имена нобелевских лауреатов. Тысячи его выпускников своими научными открытиями вершили судьбу отечества, и мы по праву этим можем гордиться.*

*Сегодня НИЯУ МИФИ – это крупнейший научно-образовательный центр и ведущий технический вуз страны, который вносит уникальный вклад в развитие отечественной науки, стратегических отраслей экономики и оборонно-промышленного комплекса. Это мировой центр физической науки и ядерного образования, колыбель лазерных технологий, кузница и хранитель ядерного щита нашей Родины.*

*С честью продолжая подвижнические традиции предшественников, и при этом будучи открытым ко всему новому, НИЯУ МИФИ реализует суперсовременные идеи – от цифровых квантовых технологий до инноваций в тяжелом машиностроении, от освоения Арктики и развития ледокольного флота до ядерной медицины. Университет расширяет статусность ядерного вуза и готовит кадры для широкого круга высокотехнологичных отраслей.*

*НИЯУ МИФИ создает продукты, в которых нуждаются тысячи предприятий, и решает самые сложные задачи, которые ставит время, отечество и современная мировая наука. По числу международных коллабораций МИФИ превосходит многие университеты страны.*

*Практическая инновационная направленность вуза, профессионализм профессорско-преподавательского коллектива, новейшие образовательные технологии, мощная исследовательская база и тесное сотрудничество с ведущими предприятиями Госкорпорации «Росатом» позволяют коллективу университета готовить профессионалов высочайшего уровня, способных не только осуществить технологические перемены, но, в соответствии с новыми вызовами современной действительности, способствовать достижению Россией технологического лидерства, суверенитета и национальной безопасности.*

*Решая эту первостепенную задачу, НИЯУ МИФИ совместно со своими филиалами сохраняет связь времен, динамично развивается в настоящем и уверенно смотрит в будущее!*

В.А. Руденко,  
руководитель ВИТИ НИЯУ МИФИ

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

УДК 621.039 : 323.28 : 539.4  
DOI 10.26583/gns-2022-04-01  
EDN BGSRL

**БИОЛОГО-ХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РОСТОВСКОЙ АЭС  
КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ  
БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО  
И ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

© 2022 Горская Ольга Ивановна

АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск, Ростовская обл., Россия  
gorskaya-oi@vdnpp.rosenergoatom.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3377-4654>

*Аннотация.* Системы технического и циркуляционного водоснабжения атомных станций используют воду природных или технических водных объектов для обеспечения водоснабжения атомных станций. Отдельные элементы и оборудование технической воды, называются системой технического водоснабжения. В системах технического и циркуляционного водоснабжения биологические обрастания представляют собой совокупность микроорганизмов, водорослей, моллюсков, губок, мшанок и других биологических организмов, поселившихся и развивающихся на теплообменной поверхности аппаратов, в трубопроводах и на конструкциях охладителей оборотной воды. Эти обрастания образуются вследствие заноса микроорганизмов и расселительных форм организмов-обрастателей с водой из источника. С целью предупреждения и ликвидации биологических помех на оборудовании систем технического и циркуляционного водоснабжения атомных станций в АО «Концерн Росэнергоатом» принята производственная программа, направленная на проведение регулярного биолого-химического мониторинга систем водоснабжения атомных станций.

*Ключевые слова:* Ростовская АЭС, водоем-охладитель, система циркуляционного и технического водоснабжения, биолого-химический мониторинг, Цимлянское водохранилище, приплотинный участок, градирня, продувка, биологические обрастания, биоплёнка, организмы-обрастатели, дрейссена.

*Для цитирования:* Горская О.И. Биолого-химический мониторинг Ростовской АЭС как эффективный инструмент предупреждения биологических помех в системах циркуляционного и технического водоснабжения // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 6-14 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-01>.

Поступила в редакцию 19.09.2022  
После доработки 21.11.2022  
Принята к печати 29.11.2022

Системы технического и циркуляционного водоснабжения атомных станций используют воду природных или технических водных объектов для обеспечения водоснабжения систем и оборудования атомных станций ответственных и неответственных потребителей.

Система технического водоснабжения АЭС предназначена для отвода тепла от основных и вспомогательных агрегатов в окружающую среду. Отдельные элементы и оборудование технической воды, рассматриваемые как единое целое, называются системой технического водоснабжения [1].

Ответственные потребители – это системы и оборудование атомной станции, допускающие перерыв водоснабжения на время от десятков секунд до нескольких минут с последующим обязательным восстановлением поступления воды. Неответственные потребители – это системы и оборудование атомной станции, перерыв в водоснабжении которых без развития аварийной ситуации может составлять более длительный промежуток времени, например, от нескольких минут до нескольких часов с последующим обязательным восстановлением поступления воды.

Контур охлаждающей циркуляционной воды включает в себя конденсаторы паровых турбин, маслоохладители и воздухоохладители турбинных агрегатов. К системам технической воды ответственных потребителей относятся теплообменники бассейнов выдержки и перегрузки, теплообменники расхолаживания реакторной установки, теплообменники охлаждения продувочной воды реакторной установки, теплообменники автономных контуров охлаждения главных циркуляционных насосов и ряд другого технологического оборудования. К системам технической воды неответственных потребителей относятся подшипники насосов, теплообменники вентиляционных систем и теплообменники доохлаждения продувочной воды парогенераторов.

Кроме этого, на атомных станциях водоснабжение подается в системы подпитки I и II контуров, тепловой сети, санитарно-бытового и хозяйственно-бытового водоснабжения.

В системах технического и циркуляционного водоснабжения биологические обрастания представляют собой совокупность микроорганизмов, водорослей, моллюсков, губок, мшанок и других биологических организмов, поселившихся и развивающихся на теплообменной поверхности аппаратов, в трубопроводах и на конструкциях охладителей оборотной воды [2]. Эти обрастания образуются вследствие заноса микроорганизмов и расселительных форм организмов-обрастателей с водой из источника и наличия благоприятных условий для их размножения в системе оборотного водоснабжения – комфортная температура воды в диапазоне 15-40°C, присутствие в воде питательных веществ, необходимых для роста и развития организмов-обрастателей, наличие удобных субстратов для заселения.

Появление в трубах и на стенках теплообменных аппаратов биологических обрастаний снижает напор воды, в результате чего насосы не в состоянии подавать нужное для охлаждения количество воды. Большое значение имеет обрастание на различных теплообменных поверхностях, в частности в системах водоснабжения тепловых и атомных электростанций. Так, вследствие образования на трубках конденсаторов электростанции слоя обрастания всего 0,1 мм теплоотдача снижается с 3700 до 900 ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°C), т.е. более чем в 4 раза [3].

Ухудшение условий теплопередачи и уменьшение расходов охлаждающей воды приводят к снижению эффекта охлаждения, нарушению технологических режимов работы теплообменных аппаратов и, в конечном итоге, к значительным производственным и экономическим потерям.

Качественный и количественный состав и интенсивность биологических обрастаний зависят от физических и химических свойств воды, а также от условий ее использования. Основными формами биологических обрастаний являются зооглейные и нитчатые бактерии, водоросли различных групп, инфузории и другие простейшие, мшанки, губки, моллюски.

Бактерии всегда появляются первыми в составе обрастаний закрытых теплообменных аппаратов, в трубопроводах, на градирнях, в брызгальных бассейнах, а также на оросительных холодильниках. Самыми первыми появляются так называемые зооглейные бактерии, образующие более или менее крупные студенистые скопления клеток, окруженных слизистой капсулой. Весьма часто в водопроводных трубах

поселяются нитчатые железобактерии, которые значительно уменьшают пропускную способность труб, вплоть до их полного закупоривания.

Бактерии, первыми заселяющими поверхность трубопроводов, теплообменников и другого оборудования формируют биопленку.

Биоплёнка – это конгломерат микроорганизмов, расположенных на какой-либо поверхности, клетки которых прикреплены друг к другу. Обычно клетки погружены в выделяемое ими внеклеточное полимерное вещество (внеклеточный матрикс) – слизь. Развитие биоплёнки, а иногда и саму биоплёнку также называют биообрастанием. Термин «биоплёнка» определяется по-разному, но в целом можно сказать, что биоплёнка – обладающее пространственной и метаболической структурой сообщество (колония) микроорганизмов, расположенных на поверхности раздела сред и погружённых во внеклеточный полимерный матрикс. Обычно биоплёнки образуются в контакте с жидкостями при наличии необходимых для роста веществ.

Сформировавшиеся биопленки формируют субстрат, к которому прикрепляются велигеры двустворчатых моллюсков, статобласты мшанок, геммулы губок, споры водорослей. С этого момента развивается второй этап формирования биологического обрастания – развитие колониальных форм организмов-обрастателей, которые вызывают нарушение теплообменной и охлаждающей способности оборудования, нарушение водотока вплоть до полной закупорки просветов трубопроводов.

Частным распространённым видом биопомех является биодеструкция. Наиболее агрессивные биодеструкторы материалов – микроорганизмы, грибы, микроводоросли, которые входят в состав сформировавшегося биообрастания как его отдельных компонент, либо формируют самостоятельную разновидность биообрастания – биопленки. Жизнедеятельностью нежелательных микроорганизмов-биодеструкторов обусловлено более 40 % регистрируемых биоповреждений, их агрессивные метаболиты – одна из основных причин биокоррозии.

Биопомехи, возникающие в водоеме-охладителе, могут привести к отклонениям его характеристик от проектных. Так, скопление на дне водоема биогенных отложений в виде раковин моллюсков, остатков высших водных растений приводит к уменьшению глубины водоема, созданию предпосылок массового поступления в системы водоснабжения влекаемых биогенных наносов [4].

Биопомехи в системах подведения и отведения циркуляционной охлаждающей воды, устройствах дополнительного охлаждения (подводящий, отводящий каналы, брызгальные бассейны, градирни) наиболее опасны, так как они сказываются непосредственно на работе блочной насосной станции и систем водоснабжения. Биопомехи вызываются личинками дрейссены, которые с током воды могут распространяться по техническим водоводам и формировать обрастание. Поселение в канале одних организмов, вызывающих биопомехи, может создавать условия для поселения других. Так, поселение дрейссены на твердом бетонном субстрате создает условия для произрастания укореняющихся высших водных растений.

Для перифитона (биологических обрастателей) качество субстрата очень важно, но, как отмечено многими исследователями, заселяются практически все субстраты, попадающие в воду. В этом состоит сложность борьбы с обрастанием. Однако состав и обилие организмов перифитона на разных субстратах может значительно различаться даже в одном водоеме и при сходных прочих условиях.

Проблема формирования биологических обрастаний в системах технического и циркуляционного водоснабжения остро стоит для атомной энергетики всего мира.

Общий мировой ущерб от биопомех составляет более 50 млрд. долларов США в год. Только в США ежегодные затраты на ликвидацию биологических обрастаний чужеродным понто-каспийским двустворчатым моллюском *Dreissena polymorpha* и *Dreissena bugensis* (в судоходстве, питьевом водоснабжении, электроэнергетике) составляет более 3,1 млрд. долларов [5].

Биологические помехи регистрируются и на российских атомных станциях. Видовой спектр организмов обрастателей варьирует в зависимости от климатических особенностей региона размещения конкретной атомной станции, особенностей ее системы технического водоснабжения, характеристик источника водоснабжения и других показателей, однако биологические помехи той или иной степени интенсивности регистрируются на всех атомных станциях.

С целью предупреждения и ликвидации биологических помех на оборудовании систем технического и циркуляционного водоснабжения атомных станций в АО «Концерн Росэнергоатом» принята производственная программа, направленная на проведение регулярного биолого-химического мониторинга систем водоснабжения атомных станций [6, 7].

Биолого-химический мониторинг – это одно из направлений экологического мониторинга, которое реализуется через постоянно действующую систему долговременных регулярных наблюдений в пространстве (сеть наблюдений) и во времени (режим наблюдений), направленную на получение информации о состоянии (пространственном распределении, временной динамике, количественным показателям) ключевых биологических объектов (сообществ, группировок живых организмов, популяций отдельных видов), протекании биологических процессов (продукции и деструкции органического вещества) а также информации об основных параметрах окружающей среды (гидрофизических и гидрохимических), характеризующих условия существования ключевых биологических объектов и формирующихся, в том числе под влиянием внешних факторов – естественных и антропогенных [8].

Полученная в ходе проведения биолого-химического мониторинга информация позволяет оценивать степень развития рисков формирования биологических обрастаний и биологических помех на оборудовании систем водоснабжения, проводить оценку этих рисков, своевременно разрабатывать и выполнять планы мероприятий по управлению рисками. Таким образом можно предупредить отказы и остановки оборудования, повысить надежность систем водоснабжения, снизить эксплуатационные расходы.

На Ростовской атомной станции биолого-химического мониторинг выполняется на регулярной основе, начиная с 2015 года. Биолого-химический мониторинг осуществляется на сети наблюдений, охватывающей открытую часть системы технического водоснабжения (акваторию водоема-охладителя Ростовской АЭС и части акватории водоема подпитки – Приплотинного плеса Цимлянского водохранилища, внешних гидротехнических сооружений – выпускных и подводящих каналах, вблизи отсыпок дамб, на элементах оборудования водозаборных сооружений, а также башенных испарительных градирен) и закрытую часть системы технического водоснабжения Ростовской АЭС.

Наблюдения биолого-химического мониторинга осуществляются в трех основных режимах:

- регулярном, с периодичностью от нескольких дней до одного раза в квартал в зависимости от жизненного цикла организмов-мишеней и технологического цикла Ростовской АЭС на базовых станциях сети наблюдений;
- ежегодном, в течение вегетационного периода, с периодичностью один-три раза в год (в зависимости от показателя) на сети наблюдений, охватывающей наиболее важные участки открытой части системы технического водоснабжения;
- инвентаризационном, с периодичностью 1 раз в 3 года на всех участках системы технического водоснабжения на расширенной сети наблюдений.

Кроме этого, наблюдения вне режима осуществляются на осушенных и вскрытых участках оборудования внутренней части систем технического водоснабжения и

гидротехнических сооружениях в соответствии с графиком плановых мероприятий и неплановыми осушкой и вскрытиями оборудования.

На Ростовской АЭС разработаны индивидуальная программа биолого-химического мониторинга и индивидуальная дорожная карта в случаях проведения биомелиорационных (рыбохозяйственных) и биоремедиационных (альголизация) мероприятий, испытаний новых методов защиты оборудования СТВ от биопомех, обнаружения новых типов биопомех

В соответствии с МТ 1.1.4.02.999.1774-2020 [8] на Ростовской АЭС проводятся непрерывные наблюдения за динамикой расселительных стадий обрастателей и других нежелательных организмов как основы планирования защитных мероприятий, специализированные наблюдения за обрастанием на внешних гидротехнических сооружениях, наблюдения на внутренних участках систем технического водоснабжения (технический мониторинг). Кроме этого, специалисты Ростовской АЭС и привлеченные специалисты специализированных подрядной организации проводят работы по оптимизации использования биоцидных обработок, тестированию в производственных условиях различных средств и методов борьбы с биологическими обрастаниями.

В процесс мониторинга наличия биологических обрастаний и биологических помех включены специалисты цехов-владельцев оборудования, которые имеют возможность в ежедневном режиме контролировать технологические параметры работы, оборудования, отмечать все изменения и отклонения в работе оборудования, связанные с развитием биопомех. При выполнении работ на вскрытом оборудовании специалисты цехов имеют возможность непосредственно выявлять наличие биологических обрастаний.

При обнаружении организмов-обрастателей на внутреннем оборудовании системы технического водоснабжения и башенных испарительных градирен в период осмотров и ремонтов эксплуатационным персоналом производится их фотофиксация, отбор и консервация проб для последующей передачи на идентификацию, оформление карт информационного опроса персоналом цехов-владельцев оборудования.

Одним из результатов наблюдений в рамках технического мониторинга является выявление вторичных очагов расселения нежелательных организмов, источников формируемого ими обломочного материала (биогенных наносов), оценка распределения и количественного развития обрастания в зависимости от наиболее важных параметров среды, использование результатов для создания и верификации карт (атласа) биопомех с целью выявления причин и прогноза возможного аномального развития нежелательных биологических организмов в системе технического водоснабжения.

Одновременно осуществляется контроль физико-химических параметров циркуляционной и технической воды, воды водоема-охладителя и водоема подпитки – Цимлянского водохранилища с целью установления условий, способствующих или препятствующих росту популяций организмов-биообрастателей, их расселению и колонизации новых участков оборудования и трубопроводов, гидротехнических сооружений.

За время проведения биолого-химического мониторинга на Ростовской АЭС были определены: состав сообществ организмов-биообрастателей, перечень оборудования и гидротехнических сооружений, подверженных биологическим обрастаниям, составлены карты распространения биопомех, установлены долговременные тренды развития сообществ организмов-биообрастателей в зависимости от складывающихся гидрологических, гидрофизических и гидрохимических условий в открытой и закрытой частях систем технического и циркуляционного водоснабжения.

Непрерывно проводимый анализ рынка современных противообрастательных технологий, противообрастательных покрытий, биоцидных препаратов позволил

протестировать и внедрить в производственный процесс новые эффективные средства и методы предупреждения биологических обрастаний, биологической коррозии.

Результаты биолого-химического мониторинга на Ростовской АЭС показывают, что в структуре биопомех на оборудовании внутренней части системы технического водоснабжения вносят двустворчатые моллюски *Dreissena polymorpha* и *Dreissena bugensis*. Свой вклад в структуру биопомех также вносят пресноводные мшанки. На конструктивных элементах башенных испарительных градирен формирование биопомех связано преимущественно с развитием зеленых нитчатых водорослей нескольких видов и двустворчатого моллюска – дрейссены. В условиях внутренней части системы технического водоснабжения АЭС и гидротехнических сооружений Ростовской складываются благоприятные условия для развития популяций зеленых нитчатых водорослей, двустворчатых моллюсков двух видов рода двустворчатых моллюсков *Dreissena*, мшанок *Plumatella emarginata*, *Plumatella fungosa* [9].

Специалисты-биологи на протяжении последних лет не регистрировали негативной динамики, связанной с расширением спектра видов организмов-биообрастателей, критическим ростом численности их популяций в пределах внутренней части системы технического водоснабжения Ростовской АЭС, сукцессионными процессами в сообществах гидробионтов и прежде всего, организмов – биообрастателей во внешней части системы технического водоснабжения (водоем-охладитель Ростовской АЭС). Вместе с тем вероятность появления новых чужеродных видов, способных вызывать биологические обрастания остается высокой в связи с тем, что открытая часть системы технического водоснабжения Ростовской АЭС не является изолированной системой, а водоем подпитки – Цимлянское водохранилище является транзитным хабом для перевозки различных грузов водным транспортом. В этих условиях всегда существует возможность попадания в экосистему новых чужеродных видов, прикрепившихся к речным и морским судам.

Специалистами отмечается [9-11], что спектр оборудования внутренней части СТВ, на котором регистрируются биопомехи, за последние годы существенных изменений не претерпел, а интенсивность биопомех варьирует в зависимости от сезонных особенностей протекания вегетационного периода.

Технические меры, предпринимаемые специалистами Ростовской АЭС для предупреждения развития биопомех на оборудовании СТВ, трубопроводах циркуляционного и технического водоснабжения (механическая очистка оборудования, гидромеханическая очистка, шарикоочистка, хлорирование, использование ингибитора коррозии Оптион 713, использование фильтров «Taprogge», спецокраска оборудования, трубопроводов, гуммирование внутреннего просвета оборудования демонстрируют высокую степень эффективности.

В целом, прогнозные данные по развитию биопомех на оборудовании внутренней части системы технического водоснабжения Ростовской АЭС, гидротехнических сооружений, а также касающиеся динамики популяций организмов-обрастателей в водоеме-охладителе позволяют констатировать, что в настоящий момент риск развития биопомех носит умеренный характер, а популяции организмов обрастателей в водоеме-охладителе в 2022 г. не претерпят выраженных изменений.

В случае необходимости принятия оперативных и долгосрочных мер борьбы с биологическими обрастаниями сформированы базы данных о перспективных и эффективных методах борьбы с биообрастаниями, оценена экономическая эффективность их применения, сформированы краткосрочные и долгосрочные планы по предупреждению биопомех.

В качестве рекомендательных мер, направленных на предупреждение биопомех на Ростовской АЭС специалистами специализированной подрядной организации предложено принимать оперативные меры по механической очистке оборудования, проведения интенсивных разовых биоцидных обработок оборудования, использования

ряда перспективных биоцидных препаратов – например, диоксида хлора, применения современных эффективных биоцидосодержащих лакокрасочных материалы, а также не содержащих биоцидные вещества полимерных покрытий. Также, применительно к технологическому оборудованию Ростовской АЭС рекомендовано использование самоочищающихся механических фильтров.

Рассматривается возможность продолжения тестирования в производственных условиях современных противообратательных технологий, основанных на физических принципах борьбы с организмами-обратателями.

Отмечается высокая эффективность проведения альголизации водоема-охладителя Ростовской АЭС и Приплотинного плеса Цимлянского водохранилища. Ежегодная альголизация позволяет предупреждать развитие сине-зеленых водорослей, взрывообразный рост популяции которых в водоемах Ростовской области может служить причиной механической закупорки трубопроводов, сороудерживающих сетов, а также являться причиной заморов рыбы и резкого ухудшения гидрохимического режима водоемов.

Кроме того, констатируется положительный эффект реализации стратегии биологической мелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС и Цимлянского водохранилища, который проявляется в успешном регулировании развития популяций высшей водной растительности, организмов-обратателей непосредственно в водоемах, гармонизации ихтиоценоза водных объектов [7, 12].

Специалисты отмечают, что на Ростовской АЭС функционирует эффективная система борьбы с биопомехами, позволяющая минимизировать возможность развития нештатных ситуаций на оборудовании системы технического и циркуляционного водоснабжения, экономические потери

В целом, оценивая целесообразность и эффективность биолого-химического мониторинга, проводимого на Ростовской АЭС, можно говорить, что он действенным инструментом предупреждения биологических помех в системах циркуляционного и технического водоснабжения. Благодаря регулярному проведению биолого-химического мониторинга осуществляется сбор информации о состоянии экосистем водоемов-охладителей, пространственном распределении, состоянии и динамике популяций видов-источников возникновения и развития биопомех в системах технического и циркуляционного водоснабжения атомной станции.

Получаемые в ходе проведения биолого-химического мониторинга данные в комплексе с информационными данными, позволяют иметь полную картину текущего состояния природных объектов в районе размещения Ростовской атомной станции, оценивать степень экологического воздействия атомной станции на окружающую среду, а также регулировать степень воздействия окружающей среды на безопасную эксплуатацию атомной станции.

Полученные результаты мониторинга (информация) дают возможность выбора и планирования применения мер предупреждения и контроля развития организмов-обратателей на оборудовании СТВ, локализации и контроля их поселений на оборудовании системы технического водоснабжения Ростовской АЭС, в водоеме-охладителе и водоеме-подпитки для обеспечения бесперебойной и безопасной работы технологического оборудования [9, 10].

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Водопользование на атомных станциях. Классификация охлаждающих систем водоснабжения. Стандарт организации. СТО 1.1.1.02.006.0689-2019. – АО «Концерн Росэнергоатом», 2019. – 48 с.
2. *Макрушин, А.В.* Библиографический указатель по теме «Биологический анализ качества вод» с приложением списка организмов-индикаторов загрязнения / Макрушин А.В. – Ленинград : АН СССР, 1974. – 53 с.

3. *Лудянский, М.Л.* Методы борьбы с биологическими обрастаниями в системе водоснабжения металлургического предприятия / М.Л. Лудянский, А.П. Выскребец // *Промышленная энергетика*. – 1981. – № 11. – С. 123-129.
4. *Морозовская, И.А.* Зооперифитон и обрастание в водоемах-охладителях атомных и тепловых электростанций / И.А. Морозовская, А.А. Протасов // *Ядерная энергетика та доккілля*. – 2013. – № 2. – С. 55-58. – URL : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/jaed\\_2013\\_2\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/jaed_2013_2_11).
5. *Орлова, М.И.* Биообрастание, морские и континентальные воды: теория, практика, перспективы региональных междисциплинарных исследований / М.И. Орлова, В.А. Родионов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 121-136.
6. *Методические рекомендации по применению методов борьбы с биопомехами.* МР 1.1.4.04.1542-2019. – Москва. – 239 с.
7. *Предупреждение развития биологического обрастания на оборудовании систем технического водоснабжения и в водоеме-охладителе Ростовской АЭС с учетом расширения Ростовской АЭС до мощности 4000МВт. Долгосрочная программа.* ГТП-09/13/241/9/199731-Д-СП. – 141 с.
8. *Ведение биолого-химического мониторинга систем циркуляционного и технического водоснабжения атомных станций. Методика.* МТ 1.1.4.02.999.1774-2020. – Москва. – 71 с.
9. *Отчет о результатах биолого-химического мониторинга СТВ Ростовской АЭС.* ГТП-2021 – 06/13/1136/9/137042-Д – 03 – СП. – ООО НПО «Гидротехпроект», 2021.
10. *Отчет о результатах биолого-химического мониторинга СТВ Ростовской АЭС.* ГТП-2020. – 06/13/180/9/111324-Д – 03 – СП. – ООО НПО «Гидротехпроект», 2020. – 313 с.
11. *Отчет о результатах биолого-химического мониторинга СТВ Ростовской АЭС.* ГТП-2019 – 08/57/54/9/75522-Д – 03 – СП. – ООО НПО «Гидротехпроект», 2019. – 313 с.
12. *Ростовская АЭС. Обоснование мер по сохранению биоресурсов и среды их обитания при осуществлении хозяйственной деятельности по эксплуатации энергоблока № 4 в 18-месячном топливном цикле на мощности реакторной установки 104% от номинальной с вентиляторными градирнями.* – Отчет. – ООО НПО «Гидротехпроект». – СП. – 2022. – 596 с.

## REFERENCES

- [1] *Vodopol'zovanie na atomnyh stanciyah. Klassifikaciya ohlazhdayushchih sistem vodosnabzheniya. Standart organizacii. STO 1.1.1.02.006.0689-2019* [Water Management in Nuclear Power Plants. Classification of Cooling Water Supply Systems. Standard of the Organization. STO 1.1.1.02.006.0689-2019], JSC Concern Rosenergoatom, 2019, 48 p. (in Russian).
- [2] *Makrushin, A.V. Bibliograficheskij ukazatel' po teme «Biologicheskij analiz kachestva vod» s prilozheniem spiska organizmov-indikatorov zagryazneniya* [Bibliography on "Biological Analysis of Water Quality" with Annexed List of Indicator Organisms], Leningrad: AN SSSR [Leningrad: USSR Academy of Sciences], 1974, 53 p. (in Russian).
- [3] *Ludyanskiy, M.L. Metody bor'by s biologicheskimi obrastaniyami v sisteme vodosnabzheniya metallurgicheskogo predpriyatiya* [Methods to Control Biological Fouling in the Water Supply System of Metallurgical Plant], *Promyshlennaya energetika* [Industrial power], 1981, no. 11, p. 123-129 (in Russian).
- [4] *Morozovskaya, I.A. Zooperifiton i obrastanie v vodoemah-ohladitelyah atomnyh i teplovyh elektrostancij* [Zooperyphyton and Fouling in Cooling Ponds of Nuclear and Thermal Power Plants], *Ядерная энергетика та доккілля*, 2013, no. 2, pp. 55-58, [http://nbuv.gov.ua/UJRN/jaed\\_2013\\_2\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/jaed_2013_2_11) (in Russian).
- [5] *Orlova, M.I. Bioobrastanie, morskije i kontinental'nye vody: teoriya, praktika, perspektivy regional'nyh mezhdisciplinarnykh issledovanij* [Biofouling, Marine and Continental Waters: Theory, Practice, Perspectives for Regional Interdisciplinary Research], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2020, vol. 13, no. 4, pp. 121-136 (in Russian).
- [6] *Metodicheskie rekomendacii po primeneniyu metodov bor'by s biopomekhami. MR 1.1.4.04.1542-2019* [Methodological Recommendations on the Application of Biosolids Control Techniques. MR 1.1.4.04.1542-2019]. Moscow, 239 p. (in Russian).
- [7] *Preduprezhdenie razvitiya biologicheskogo obrastaniya na oborudovanii sistem tekhnicheskogo vodosnabzheniya i v vodoeme-ohladitele Rostovskoj AES s uchetom rasshireniya Rostovskoj AES do moshchnosti 4000MVt. Dolgosrochnaya programma. GTP-09/13/241/9/199731-D-SP* [Prevention of Biological Fouling Development on the Equipment of Technical Water Supply Systems and in the Cooling Pond of Rostov NPP Taking into Account Expansion of Rostov NPP up to 4000 MW Capacity. Long Term Programme. GTP -09/13/241/9/199731 – D-SP], 141 p. (in Russian).

- [8] Vedenie biologo-himicheskogo monitoringa sistem cirkulyacionnogo i tekhnicheskogo vodosnabzheniya atomnyh stancij. Metodika. MT 1.1.4.02.999.1774-2020 [Maintaining Biological and Chemical Monitoring of the Circulating and Technical Water Supply Systems of Nuclear Power Plants. Methodology. MT 1.1.4.02.999.1774-2020]. Moscow, 71 p. (in Russian).
- [9] Otchet o rezul'tatah biologo-himicheskogo monitoringa STV Rostovskoj AES. GTP – 2021 – 06/13/1136/9/137042-D – 03 – SP [Report on the Results of Biological and Chemical Monitoring of the Rostov NPP STS. GTR – 2021 – 06/13/1136/9/137042-D – 03 – SP], OOO NPO «Gidrotekhproekt» [Research and Production Association "Gidrotekhproekt" Ltd], 2021 (in Russian).
- [10] Otchet o rezul'tatah biologo-himicheskogo monitoringa STV Rostovskoj AES. GTP-2020. – 06/13/180/9/111324-D – 03 – SP [Report on the Results of Biological and Chemical Monitoring of the Rostov NPP STS. GTP-2020. – 06/13/180/9/111324-D – 03 – SP], OOO NPO «Gidrotekhproekt» [Research and Production Association "Gidrotekhproekt" Ltd], 2020, 313 p. (in Russian).
- [11] Otchet o rezul'tatah biologo-himicheskogo monitoringa STV Rostovskoj AES. GTP – 2019 – 08/57/54/9/75522-D – 03 – SP [Report on the Results of Biological and Chemical Monitoring of the Rostov NPP STS. GTR – 2019 – 08/57/54/9/75522-D – 03 – SP], OOO NPO «Gidrotekhproekt» [Research and Production Association "Gidrotekhproekt" Ltd], 2019, 313 p. (in Russian).
- [12] Rostovskaya AES. Obosnovanie mer po sohraneniyu bioresursov i sredy ih obitaniya pri osushchestvlenii hozyajstvennoj deyatel'nosti po ekspluatacii energobloka № 4 V 18-mesyachnom toplivnom cikle na moshchnosti reaktornoj ustanovki 104% ot nominal'noj s ventilyatornymi gradirnyami [Rostov NPP. Justification of Measures on Preservation of Bioresources and their Habitats during Economic Activity on Operation of Power Unit No.4 In 18-month Fuel Cycle at Capacity of Reactor Unit 104% of Nominal Capacity with Fan Cooling Towers], Report, OOO NPO «Gidrotekhproekt». St. Petersburg, 2022, 596 p. (in Russian).

## **Biological and Chemical Monitoring of Rostov NPP as Effective Tool to Prevent Biological Disturbances in the Circulation and Technical Water Supply Systems**

**Olga I. Gorskaya**

*АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск, Россия  
gorskaya-oi@vdrnpp.rosenergoatom.ru; ORCID iD: 0000-0003-3377-4654*

*Received by the editorial office on 09/19/2022*

*After completion on 11/21/2022*

*Accepted for publication on 11/29/2022*

*Abstract.* The technical and circulating water supply systems of nuclear power plants use water from natural or technical water bodies to provide the water supply to the nuclear power plants. Individual elements and equipment of technical water, are called technical water supply systems. In technical and circulating water supply systems, biological fouling is a collection of microorganisms, algae, molluscs, sponges, bryozoans and other biological organisms that have settled and developed on the heat exchange surfaces of units, in pipelines and on the structures of circulating water coolers. This fouling is caused by the introduction of micro-organisms and dispersal forms of fouling organisms with water from the source. In order to prevent and eliminate biological fouling on the equipment of technical and circulating water supply systems of nuclear plants, Rosenergoatom Concern JSC has adopted a production programme aimed at regular biological and chemical monitoring of water supply systems of nuclear plants.

*Keywords:* Rostov NPP, cooling pond, circulating and technical water supply system, biological and chemical monitoring, Tsimlyansk Reservoir, near dam section, cooling tower, blowdown, biological fouling, biofilm, fouling organisms, zebra mussel.

*For citation:* Gorskaya O.I. Biological and Chemical Monitoring of Rostov NPP as Effective Tool to Prevent Biological Disturbances in the Circulation and Technical Water Supply Systems // Global Nuclear Safety. 2022. Vol. 4(45). P. 6-14. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-01>.

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

УДК 621.311.25 : 502.175: 628.147.2  
DOI 10.26583/gns-2022-04-02  
EDN CHYVYW

**К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ НЕОБХОДИМОСТИ ПРИКРЫТИЯ  
ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ ОТ  
УДАРОВ С ВОЗДУХА**

© 2022 Губеладзе Олег Автандилович<sup>1</sup>, Губеладзе Автандил Рубенович<sup>2</sup>

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия*

<sup>1</sup>*buba26021966@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6018-4989>*

<sup>2</sup>*buba26021966@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6966-6391>*

В статье рассматривается один из аспектов проблемы ядерного терроризма, а именно попытки осуществления «ядерного» шантажа отдельными государствами. Анализируется возможное деструктивное воздействие летательных аппаратов на объекты использования атомной энергии. С помощью упрощенной математической модели проведена экспресс-оценка результата удара управляемой авиабомбы по железобетонной конструкции объекта.

*Ключевые слова:* ядерный терроризм, объект использования атомной энергии, защитная гермооболочка, летательный аппарат, управляемая авиабомба.

*Для цитирования:* Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. К вопросу обоснования необходимости прикрытия объектов использования атомной энергии от ударов с воздуха // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 15-24. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-02>.

Поступила в редакцию 27.09.2022

После доработки 28.11.2022

Принята к печати 06.12.2022

Ядерный терроризм предполагает использование в качестве оружия радиоактивных материалов. Это может быть: ядерное взрывное устройство; заражение местности радиоактивными веществами без проведения ядерного взрыва; нападение террористов на ядерный реактор с намерением его разрушить и осуществить радиоактивное заражение местности.

Один из первых инцидентов, получивших широкую огласку, произошел с французским ядерным оружием на испытательном полигоне в пустыне Сахара в 1961 году. Генералы, враждебно настроенные к президенту Франции де Голлю, планировали захватить ядерный боеприпас для шантажа руководства страны. Известен также случай, когда террористы в США требовали деньги, угрожая подорвать боеголовку (1975 г.). [1]

Наличие объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) создает объективные предпосылки для хищения радиоактивных веществ, что также представляет серьезную опасность. Конструкция ядерного боеприпаса достаточно хорошо известна, и простейшие ядерные заряды могут быть созданы даже в довольно примитивных условиях. Наиболее это реально при использовании высокообогащенного урана. Заряд «пушечного» типа (критическая масса создается путем быстрого соединения двух подкритических масс урана) может быть создан и доведен до высокого уровня

надежности без проведения ядерных испытаний, что обеспечит внезапность его использования.

Известны случаи радиационного терроризма. Так, в ноябре 1995 г. в одном из московских парков был найден контейнер с цезием-137, заложенный экстремистами. В Праге в 1993 г. были конфискованы 2,7 кг U-235, обогащенного на 87,7%, пригодного для использования при создании ядерного оружия. В 1994 г. арестованы контрабандисты (Германия), у которых изъят контейнер с 6,15 г Pu-239. Кроме того, отмечены случаи попыток осуществления актов ядерного терроризма с использованием самих ядерноопасных объектов (например, угроза взрыва Игналинской АЭС в Литве одной из преступных группировок). [1]

Террористы, обладающие достаточным количеством ядерных делящихся материалов (ЯДМ), могут имитировать некомпетентность персонала ядерноопасного объекта, а также применение тактического ядерного оружия на территории проведения военной операции. В первом случае возникает угроза установления зарубежного контроля (под эгидой ООН, МАГАТЭ) над ядерными объектами, а во втором – обвинения в необоснованном применении ядерного оружия, геноциде, что может являться поводом проведением военно-полицейской операции НАТО уже на территории РФ.

Анализ терактов последних лет позволяет с полной уверенностью сказать, что у террористов сегодняшнего дня отсутствуют какие-либо моральные и политические ограничения. Они планируют уничтожить как можно больше людей. Двадцать первый век не стал веком стабильности. Сталкиваются интересы различных этнических, религиозных, социальных и политических групп. Террористические организации выражают интересы влиятельных групп людей, которых не устраивает существующая структура общества [1-4]. Угроза применения ядерного оружия, по их мнению, парализует государственную машину, поможет изменить общество.

Попытки осуществления «ядерного» шантажа совершали и отдельные государства. Сразу после присоединения в 1994 г. к Договору о нераспространении ядерного оружия в качестве неядерного государства Украина приступила к осуществлению научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ с целью формирования технологического базиса для возможного создания собственного ядерного оружия. Четко выраженную практическую направленность и нарастающую активность эти работы приобрели в 2014 году. Ключевая роль в создании ядерного взрывного устройства отводилась Национальному научному центру «Харьковский физико-технический институт». Имеющаяся там экспериментальная база позволяла проводить широкий спектр исследований по изучению ядерных материалов, в том числе отработавших реакторных топливных сборок, которые могут использоваться для получения оружейного плутония. В качестве площадки разработки ядерного оружия использовалась зона Чернобыльской АЭС. Там шли работы как по изготовлению «грязной» бомбы, так и по выделению плутония. Естественный для Чернобыльской зоны повышенный радиационный фон скрывал проведения таких работ. Стоит отметить, что «грязная» бомба как средство вооруженной борьбы не имеет смысла, так как ее поражающая способность невысока, однако она обеспечивает высокий уровень радиации в месте подрыва. Поэтому она является исключительно террористическим оружием.

В последние годы Киев неоднократно заявлял о желании выйти из соглашения. Все началось задолго до Крыма, еще при президенте В.А. Ющенко. В 2016 г. выйти из соглашения призывал П.А. Порошенко. Тогда же в Киеве заявили, что ядерное разоружение – историческая ошибка Украины. 19 февраля 2022 г. на Мюнхенской конференции по безопасности президент Украины В.А. Зеленский заявил о претензиях на ядерный статус. Это могло стать реальностью уже в самой ближайшей перспективе.

Отдельной проблемой является воздействие обычными средствами поражения по атомным электростанциям. Во время нахождения Запорожской АЭС (ЗАЭС) под контролем украинских властей на ее территории проводились запрещенные эксперименты. Зафиксировать все нарушения украинской стороны должны были специалисты МАГАТЭ по приглашению Российской Федерации, но, когда стало известно о приезде представителей организации, президент Украины отдал приказ начать обстрел. В 2022 году, после начала проведения специальной военной операции по денацификации и демилитаризации Украины, были отмечены конкретные действия киевского режима, которые могли привести к экологической катастрофе:

– 4 марта киевский режим предпринял провокацию на Запорожской АЭС: сначала диверсионная группа открыла шквальный огонь из стрелкового оружия, а затем совершила поджог учебно-тренировочного корпуса;

– 6 марта украинские националисты нанесли удар по объектам, обеспечивающим энергоснабжение Чернобыльской АЭС (были приняты оперативные меры по переходу на резервные дизель-генераторные источники питания);

– 5 августа на Запорожской АЭС в результате нескольких артиллерийских обстрелов на месте возник пожар, были оборваны две линии электропередачи, необходимые для функционирования энергоблоков. Была обесточена часть аппаратуры энергоблока № 3, снижена вырабатываемая мощность энергоблока № 4;

– 7 августа нанесен удар из РСЗО «Ураган» по Запорожской АЭС, осколки и ракетный двигатель упали не более чем в 400 метрах от действующего энергоблока станции. В зоне поражения оказались район сухого хранилища отработанного ядерного топлива и пост автоматизированного контроля радиационной обстановки. Повреждены административные постройки и прилегающая территория хранилища. Важно отметить, что от места падения осколочных боевых элементов и самого ракетного двигателя до действующего энергоблока – не более 400 метров (рис. 1). А в 12 часов 40 минут обстрел атомной электростанции был осуществлен подразделениями 44-й артиллерийской бригады вооруженных сил Украины (ВСУ) из района населенного пункта Марганец. Повреждена высоковольтная линия, подававшая электроэнергию в Запорожскую и Херсонскую области. На Запорожской АЭС произошел скачок напряжения, вызвавший задымление на открытом распределительном устройстве станции, сработала система защиты, отключившая подачу электроэнергии. Для предотвращения нарушения работы технический персонал станции снизил мощность 5-го и 6-го энергоблоков;



Рисунок 1 – Место падения хвостовой части ракеты в зоне действующего энергоблока Запорожской АЭС  
[The place of the fall of the rocket tail part in the area of the operating Zaporozhye NPP power unit]

– 1 сентября была произведена попытка захвата Запорожской АЭС. Нападение не случайно планировалось на дату приезда группы МАГАТЭ, чтобы сорвать эту миссию. Первый десант ВСУ высадился с надувных лодок под Ивановкой, примерно в 5 км от Энергодара в районе местных баз отдыха. Очевидно, перед ним ставилась задача

отвлечь на себя основные силы россиян. Расчет делался на то, что наши подразделения выдвинутся в Ивановку, оставив на ЗАЭС небольшой гарнизон, а в это самое время две баржи должны были высадить десант украинского спецназа прямо перед станицей, чтобы захватить ее в ходе краткосрочного боя. Поддержку нападающим должны были оказать «спящие» диверсионно-разведывательные группы в самом Энергодаре. Вооруженные силы России быстро и эффективно отреагировали на выходку боевиков ВСУ, предотвратив очередную провокацию.

Проведенный анализ показал, что не в полной мере учитываются реальные возможности средств воздушного нападения (СВН) по поражению ОИАЭ. Так 7 июня 1981 г. самолеты израильских ВВС (F-16A) нанесли бомбовый удар по ядерному реактору французского производства «Озирак», строительство которого завершалось в Ираке. 5 сентября 2007 г. – бомбардировка самолетами ВВС Израиля сирийского исследовательского объекта в Аль-Кибар. Десять израильских самолетов F-15 взлетели с одного из военных аэродромов с ракетами AGM-65. Первый F-15 выпустил ракету по сирийскому радару ПВО. Менее чем через 20 минут после этого самолеты разбомбили реактор. Все AGM-65 попали точно в здание, превратившееся в груды развалин. Следует отметить, что на этих объектах реакторы находились в стадии строительства и ЯДМ там не было, но в 2022 г. и данный «барьер» был преодолен:

- 12 июня два украинских беспилотных летательных аппарата (БПЛА) нанесли удар по зданию вблизи Запорожской АЭС (сброшены две мины калибром 120 миллиметра), повреждена кровля и остекление;

- 28 августа украинская сторона применила беспилотный летательный аппарат для нанесения удара по территории Запорожской АЭС. Огнем из стрелкового оружия украинский беспилотник удалось сбить возле здания спецкорпуса № 1, в котором хранятся ядерное топливо американского производства и твердые радиоактивные отходы. Дрон упал на крышу корпуса. Серьезных разрушений и пострадавших удалось избежать.

В шестидесятые годы 20-го века возник вопрос о защите АЭС от удара падающего самолёта. Обязательный учёт этого техногенного воздействия предусмотрен нормами проектирования АЭС [5-7] и в рекомендациях МАГАТЭ [8, 9]. Согласно п. 2.1.4. НП-064-17 Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии», к факторам, создающим внешние воздействия техногенного происхождения (техногенные факторы) относится падение летательного аппарата (ЛА) и других летящих предметов (фрагмент таблицы Приложения № 3 к федеральным нормам представлен в таблице 1) [7].

Таблица 1 – Факторы от воздействия падения летательного аппарата (фрагмент) [7] [Factors from the impact of an aircraft crash]

Процесс, явление и фактор	Возможные воздействия на площадку ОИАЭ, включая ОИАЭ	Значения параметров, согласно которым осуществляется классификация степеней опасности	Степень опасности по последствиям воздействия на объект
Падение летательного аппарата и других летящих предметов	Удар, разлив топлива, возгорание топлива, пожар	Возможная масса аппарата более 20 т	I
		Возможная масса аппарата 5 т и более, но менее или равна 20 т	II
		Возможная масса аппарата менее 5 т	III

Также в п. 3.9. НП-064-17 указано, что для каждого вновь проектируемого ОИАЭ безопасность должна обеспечиваться с учетом «...стойкости строительных конструкций локализирующих систем к локальным ударным нагрузкам от падения летательных аппаратов и других летящих предметов, равным в зоне контакта ударной

нагрузке, не менее возникающей при падении легкого самолета (5 т)...» [7].

В работах экспертов из Санкт-Петербурга [10, 11] в качестве ЛА был рассмотрен самолет RF-4E. Были приняты исходные данные: масса самолета 20000 кг, скорость 215 м/с, а угол падения изменялся в диапазоне от 0 до 45° к горизонту. Пятно удара принято в виде круга площадью 7 м<sup>2</sup>.

В 1988 г. в США был проведен натурный эксперимент, в процессе которого произведен удар самолета RF-4E со скоростью около 215 м/с в железобетонную плиту толщиной ~ 3,7 м (рис. 2). Эксперимент показал, что более 90 % кинетической энергии самолета было затрачено на его собственное разрушение, а оставшаяся – на разрушение преграды. [12]



Рисунок 2 – Этапы эксперимента [Stages of the experiment]

Кроме приведенной нагрузки, соответствующей разрушению фюзеляжа, необходимо учитывать удар двигателя массой 1665 кг, диаметром 0,91 м и скоростью 100 м/с. Угол удара тот же. Двигатель чаще всего рассматривают как абсолютно твердое тело, и расчет строительных конструкций производят по эмпирическим формулам. Однако для двигателя RF-4E можно использовать экспериментально полученную нагрузку (рис. 3) [10].

Удар самолета вызывает интенсивные колебания даже таких больших и тяжелых сооружений, как защитная гермооболочка (ЗГО), в связи с чем появляется проблема обеспечения работоспособности оборудования реакторного отделения при этом воздействии. Кроме того, помимо механического воздействия на строительное сооружение должна рассматриваться возможность пожара (взрыва) до 10 тонн авиационного топлива.

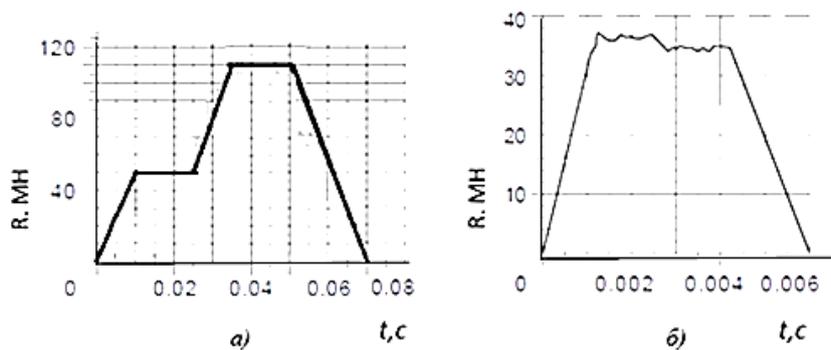


Рисунок 3 – Нагрузки при ударе RF-4E: а – нагрузка от разрушения фюзеляжа; б – нагрузка от удара турбины двигателя [RF-4E impact loads a – the load from the destruction of the fuselage; b – the load from the impact of the engine turbine]

Конструктивные особенности самолета трудно учитывать при моделировании аварийной ситуации (АС), однако стоит отметить, что они мало влияют на изменение величины нагрузки, а основное значение имеют масса ЛА и его скорость.

Аварийное падение самолета на АЭС – крайне редкое внешнее воздействие. Вероятность такого события находится в диапазоне 10<sup>-6</sup> ... 10<sup>-7</sup> в год [13]. Однако следует рассмотреть возникновение данного события в результате преднамеренных злоумышленных действий (терроризм). В связи с широким использованием

беспилотных ЛА, нельзя игнорировать возможность их применения для нанесения ударов по АЭС.

Более того, после беспрецедентного проведения серии взрывов на магистральных нитках газопроводов «Северный поток» в конце сентября 2022 г. можно ожидать применение боевой авиации противника по энергоблокам АЭС. Одним из наиболее вероятных способов вывода «Северного потока» из строя можно предположить применение боевых пловцов либо удар необитаемых подводных аппаратов. Данный тип оружия управляется по оптоволоконному кабелю и может доставить к месту удара сто и более килограммов взрывчатки. Сюда можно также добавить нахождение в этом районе группы боевых кораблей ВМФ США под командным вымпелом десантного корабля USS Kearsarge. Согласно открытым данным ударные вертолеты уже месяц до этого барражировали максимально близко к датскому острову Борнхольм (рис. 4).

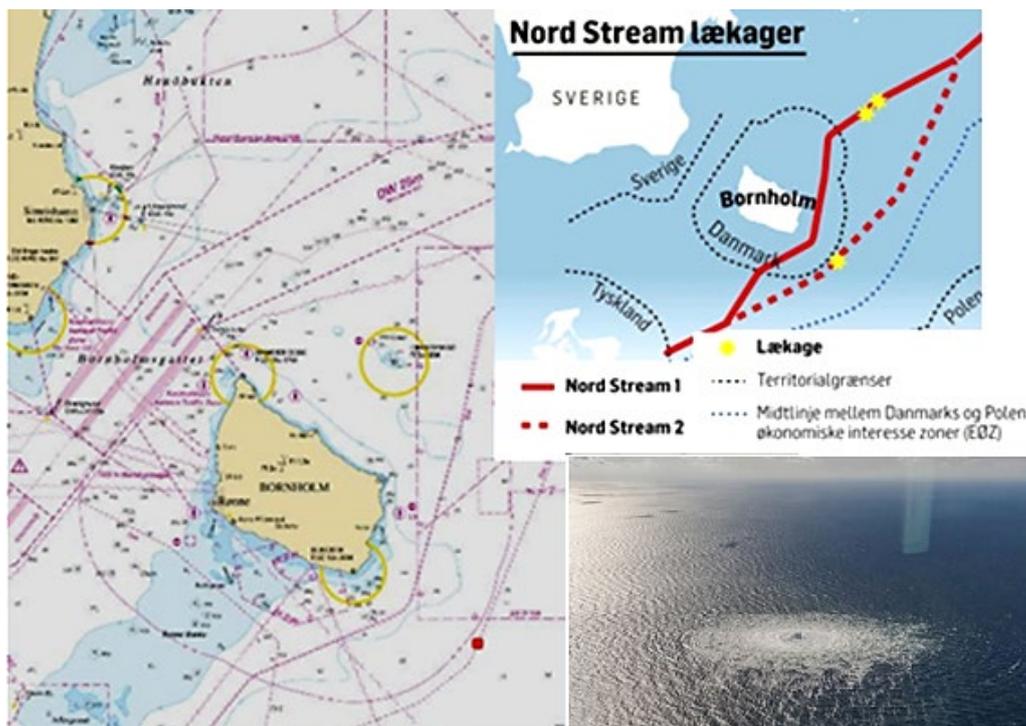


Рисунок 4 – Диверсия на газопроводе «Северный поток» [Sabotage on the Nord Stream gas pipeline]

Налицо акт международного терроризма, после которого не стоит надеяться на международные нормы, но нужно быть готовыми к воздействию средств СВН противника по ОИАЭ.

Проведем экспресс-оценку пробития железобетонной конструкции [14] ЗГО управляемой авиационной бомбой (УАБ). Глубина преодоления бетонного препятствия за счет кинетического воздействия проникающей боевой части (БЧ) определяется по формуле (1) [15]:

$$L = k_n \lambda \frac{m}{d^2} V_c \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $k_n$  – коэффициент, зависящий от характеристик материала;

$\lambda$  – коэффициент, характеризующий влияние формы БЧ;

$m$  – масса БЧ [кг];

$d$  – калибр [мм];

$V_c$  – скорость БЧ [м/с] в момент удара;

$\alpha$  – угол относительно нормали к поверхности преграды.

Пробитие за счет фугасного воздействия определяется по формуле (2):

$$h = k_{\text{вз}} \sqrt[3]{\omega \cdot k_{\text{вв}}}, \quad (2)$$

где  $k_{\text{вз}}$  – коэффициент, характеризующий сопротивление бетона взрыву;

$\omega$  – масса взрывчатого вещества [кг];

$k_{\text{вв}}$  – коэффициент, учитывающий тротильный эквивалент ВВ.

Рассмотрим воздействие GBU-28 – американской УАБ массой 2,3 тонны, принятой на вооружение в 1991 г. (рис. 5). Корпус GBU-28 изготавливается из списанных артиллерийских стволов, главным образом, 8-дюймовой (203 мм) гаубицы М110. GBU-28 способна пробить более 30 метров грунта или 6 метров бетона. Масса бомбы 2121 кг, проникающей БЧ 2004 кг.

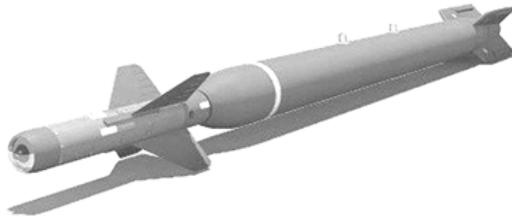


Рисунок 5 – Управляемая авиационная бомба GBU-28 [GBU-28 Guided Aerial Bomb]

В расчете также приняты:  $k_n = 9 \cdot 10^{-7}$ ;  $\lambda = 1$ ;  $d = 0,36$  м;  $k_{\text{вз}} = 0,13$ ;  $k_{\text{вв}} = 1,3$ ;  $\omega = 293$  кг. Результат показал, что суммарная величина составит 5,4 метра, что значительно превышает толщину стенки любой ЗГО.

В случае двухслойной оболочки можно ожидать более высокие показатели живучести объекта, но проведенные эксперименты на физических малоразмерных моделях не дали оснований для оптимистических оценок развития аварийной ситуации (АС) при воздействии СВН. В работе [16] приводятся результаты экспериментов с двухслойными элементами защиты (с разнесенными слоями). На рисунке 6 представлены результаты исследований, проведенных на стенде, описание которого дано в одной из статей автора [17] (моделирование кинетического воздействия ударников на двухслойную железобетонную преграду).

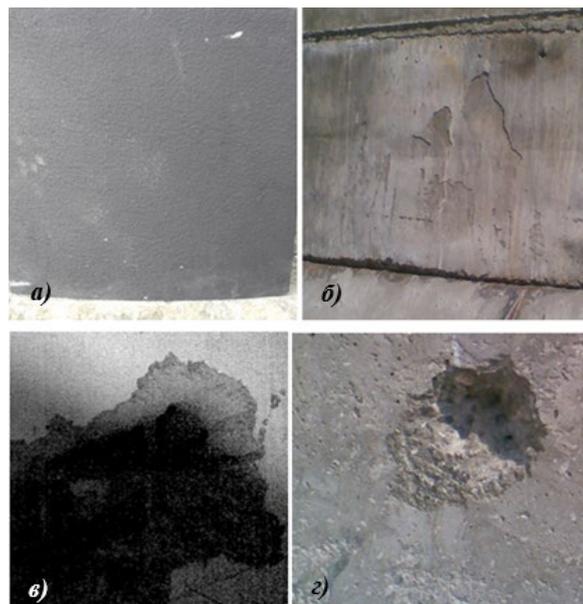


Рисунок 6 – Результаты кинетического воздействия ударников на двухслойную железобетонную преграду: а – внешняя преграда; б – второй слой; в – пробитие внешней преграды; г – повреждение второго слоя [The results of the kinetic impact of the strikers on a two-layer reinforced concrete barrier: a – external barrier; b – the second layer; c – penetration of the external barrier; d – damage to the second layer]

При обосновании требований к прикрытию ОИАЭ используются обобщенные критерии оценки эффективности [18]. Одним из них может служить отношение предотвращаемого ущерба к потенциальному ущербу, который могут нанести средства воздушного нападения. Ущерб объектов не превысит допустимого уровня, если СВН противника уже на начальном этапе понесут потери, которые лишат его преимущества в воздухе. Однако, учитывая возможность широкого применения управляемых ракет и бомб без захода его носителей в зоны поражения наземных средств ПВО, а также крылатых и баллистических ракет различного назначения, ударных беспилотных летательных аппаратов, необходимо изыскивать возможности для их поражения в полете.

В случае массированного налета СВН для системы прикрытия (СП) ОИАЭ главной задачей является поражение возможно большего числа объектов из состава групповой цели. Показателем эффективности будет математическое ожидание доли пораженных объектов каждого типа. Эффективность применения СП ОИАЭ достаточно полно характеризуется законом распределения числа пораженных объектов, который выражается через совокупность вероятностей  $P_{N,m}$  того, что из состава групповой цели будет поражено ровно  $m$  объектов из  $N$ . Распределение средств СП может быть случайным или детерминированным. В случае одиночного ОИАЭ можно считать, что случайное распределение возможно лишь в условиях потери централизованного управления системой прикрытия, а также активного применения противником помех наведению средств поражения.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Денисов, О.В.* Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения: монография / О.В. Денисов, О.А. Губеладзе, Б.Ч. Месхи, Ю.И. Булыгин; под общей редакцией Ю.И. Булыгина. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2016. – 278 с.
2. *Nedorubov A.N., Lobkovskaya N.I., Lokonova E.L. and Lupinogina Yu.A.* Islamism as Threat Factor to Construction and Operation Safety of Nuclear Power Facilities / E3S Web of Conferences. 2020. – Vol. 208, Article number 020041 : Conference on Sustainable Development: Industrial Future of Territories, IFT 2020; Ural State University of Economics Yekaterinburg; Russian Federation; 28-29 September 2020. – URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/68/e3sconf\\_if2020\\_02004/e3sconf\\_if2020\\_02004.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/68/e3sconf_if2020_02004/e3sconf_if2020_02004.html) (дата обращения: 15.09.2022) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020802004>
3. *Лобковская, Н.И.* Исламизм как вызов безопасности объектов атомной энергетики / Н.И. Лобковская, А.Н. Недорубов // Безопасность ядерной энергетики : тезисы докладов XVII Международной научно-практической конференции, Волгоград, 26-28 мая 2021 г. – Волгоград : ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 81-84.
4. *Недорубов, А.Н.* Риски радикального исламизма в вопросах безопасности строительства и эксплуатации объектов атомной отрасли / А.Н. Недорубов, Н.И. Лобковская // Глобальная ядерная безопасность. – 2021. – № 1 (38). – С. 127-132.
5. *ПиН АЭ-5.5-86.* Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа. – Москва : Минатомэнерго РФ, 1986.
6. *НП-010-16.* Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций». Приказ Ростехнадзора от 24.02.2016 N 70 (ред. от 17.01.2017) // КонсультантПлюс (официальный сайт). – URL: [http://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_196163/-5.12.2017](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163/-5.12.2017).
7. *НП-064-17.* Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии». Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 514 от 30 ноября 2017 г.
8. External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plant // IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-1.5. – IAEA. – Vienna, 2003.
9. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants // IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-3.1. – IAEA. – Vienna, 2002.
10. *Бирбраер, А.Н.* Экстремальные воздействия на сооружения / А.Н. Бирбраер, А.Ю. Роледер. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2009. – 594 с.

11. Бирбраер, А.Н. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А.Н. Бирбраер, С.Г. Шульман. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.
12. Sagano T., Tsubota Y., Kasai Y. et al. Full-Scale Aircraft Test for Calculation of Impact Force // Nucl. Engng. and Des. 1993. Vol. 140. P. 373-385.
13. Чернуха, Н.А. Вероятностное обоснование динамических нагрузок на оборудование АЭС при ударе самолета / Н.А. Чернуха, В.В. Лалин, А.Н. Бирбраер // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Том 23, № 4. – С. 159-171.
14. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Москва, 2004.
15. Губеладзе, О.А. Определение ударных ускорений на элементах конструкции малогабаритной ядерной энергетической установки при ее падении на поверхность / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 1. – С. 7-16.
16. Губеладзе, О.А. Разработка пассивной защиты подвижного агрегата с ядерно- и радиационно опасным объектом / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – №1. – С. 7-15.
17. Губеладзе, О.А. Определение влияния сопротивления грунтовой преграды на малогабаритную ядерную энергетическую установку при аварийной ситуации / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2021. – № 3. – С. 25-36.
18. Герасимов, А.И. К обоснованию уровня надежности прикрытия войск и объектов от ударов с воздуха / А.И. Герасимов, А.Г. Соколов, А.М. Елисеев // Военная мысль. – 1994. – № 2. – С. 40-43.

## REFERENCES

- [1] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territorij v chrezvy'chajny'x situacijax. Problemy' i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions.]. Rostov-on-Don, Publishing center Don State Technical University, 2016, 278 p. (in Russian).
- [2] Nedorubov A.N., Lobkovskaya N.I., Lokonova E.L. and Lupinogina Yu.A. Islamism as Threat Factor to Construction and Operation Safety of Nuclear Power Facilities / E3S Web of Conferences. 2020. – Vol. 208, Article number 020041 : Conference on Sustainable Development: Industrial Future of Territories, IFT 2020; Ural State University of Economics Yekaterinburg; Russian Federation; 28-29 September 2020, [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/68/e3sconf\\_ift2020\\_02004/e3sconf\\_ift2020\\_02004.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/68/e3sconf_ift2020_02004/e3sconf_ift2020_02004.html) (accessed 15.09.2022) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020802004> (in English).
- [3] Lobkovskaya N.I., Nedorubov A.N. Islamizm kak vy'zov bezopasnosti ob`ektov atomnoj e'nergetiki [Islamism as a challenge to the safety nuclear power facilities]. Bezopasnost' yadernoj e'nergetiki: tezisy' dokladov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Volgodonsk, 26-28 maya 2021 g. [Nuclear Energy Safety : Abstracts of the XVII International Scientific and Practical Conference, Volgodonsk, May 26-28, 2021]. Volgodonsk: VETI NRNU MEPhI, 2021, pp. 81-84 (in Russian).
- [4] Nedorubov A.N., Lobkovskaya N.I. Riski radikal'nogo islamizma v voprosax bezopasnosti stroitel'stva i e'kspluatatsii ob`ektov atomnoj otrasli [Radical Islamism Hazards in Issues of Safety of Nuclear Industry Facility Construction and Operation], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2021, № 1 (38), pp. 127-132 (in Russian).
- [5] PiN AE-5.5-86. Normy stroitel'nogo proektirovanija atomnyh stancij s reaktorami razlichnogo tipa [Norms of Construction Design of Nuclear Power Plants with Reactors of Various Types], Minatomenergo RF [Minatomenergo of the Russian Federation], 1986 (in Russian).
- [6] NP-010-16. Federalnye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Pravila ustroystva i ekspluatatsii lokalizuyushchikh sistem bezopasnosti atomnykh stantsiy" [Federal Rules and Regulations in the Field of the Use of Atomic Energy "Rules for the Design and Operation of Localizing Safety Systems for Nuclear Power Plants"], Ofitsial'nyy sayt kompanii "Konsul'tant Plyus" [Official site of the Consultant Plus company], 2016, [https://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_196163](https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163) (in Russian).
- [7] NP-064-17. Federalnye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii "Uchet vneshnih vozdeystvij prirodno i tehnogennogo proishogdenija na ob'ekty ispol'zovaniya atomnoj energii" [Federal Rules and Regulations in the Field of the Use of Atomic Energy "Consideration of external impacts of natural and man-made origin on the objects of nuclear energy use"], Ofitsial'nyy sayt kompanii "Konsul'tant Plyus" [Official site of the Consultant Plus company], 2017 (in Russian).
- [8] External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plant // IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-1.5. – IAEA. – Vienna, 2003 (in English).

- [9] External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants // IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-3.1. – IAEA. – Vienna, 2002 (in English).
- [10] Birbraer A.N., Roleder A.Yu. Ekstremalnyye vozdeystviya na sooruzheniya [Extreme Actions on Structures]. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2009, 594 p. 2009 (in Russian).
- [11] Birbraer A.N., Shulman S.G. Prochnost i nadezhnost konstruksiy AES pri osobykh dinamicheskikh vozdeystviyakh [Strength and Reliability of NPP Structures under Special Dynamic Actions]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 304 p. (in Russian).
- [12] Sagano T., Tsubota Y., Kasai Y. et al. Full-Scale Aircraft Test for Calculation of Impact Force // Nucl. Engng. and Des. 1993. Vol. 140. P. 373-385 (in English).
- [13] Chernukha N.A., Lalin V.V., Birbraer A.N. Veroyatnostnoe obosnovanie dinamicheskix nagruzok na oborudovanie AE'S pri udare samoleta [Probabilistic Justification of Dynamic Loads on NPP Equipment Caused by Aircraft Impact], Nauchno-texnicheskie vedomosti CPbPU. Estestvenny'e i inzhenerny'e nauki [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology], 2017, vol. 23, no. 4, pp. 159-171 (in Russian)
- [14] SNiP 52-01-2003. Betonny'e i zhelezobetonny'e konstrukcii. Osnovny'e polozheniya [SNiP 52-01-2003. Concrete and Reinforced Concrete Structures. The Main Provisions]. Moscow, 2004 (in Russian).
- [15] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Opredelenie udarnykh uskorenij na elementah konstrukcii malogabaritnoj yadernoj energeticheskoy ustanovki pri ee padenii na poverhnost [The Determination of Shock Accelerations on a Small Nuclear Power Plant Structural Elements in the Event of Fall to the Surface], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2020, no. 1(34), pp. 7-16 (in Russian).
- [16] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Razrabotka passivnoj zatshity podvignogo agregata s yaderno- I radiacionno opasnym ob'ektom [Passive Protection Development of the Mobile Unit of Nuclear and Radiation Hazardous Objects] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2019, no. 1(30), pp. 7-15 (in Russian).
- [17] Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Opredelenie vlijaniya soprotivleniya gruntovoj pregrady na malogabaritnuju yadernuju energeticheskuyu ustanovku pri avarijnoj situazii [Determination of Soil Barrier Resistance Influence to Compact Nuclear Power Plant at Emergency Situation], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2021, no. 3(40), pp. 25-36 (in Russian).
- [18] Gerasimov A.I., Sokolov A.G., Eliseev A.M. K obosnovaniyu urovnja nadezhnosti prikrytija vojsk I ob'ektov ot udarov s vozduha [Substantiating the Level of Reliability of Covering Troops and Objects from Air Strikes], Voennaja mysl [Military Thought], 1994, no. 2, pp. 40-43 (in Russian).

## Substantiating the Need to Cover Atomic Energy Objects from Air Strikes

Oleg A. Gubeladze<sup>1</sup>, Avtandil R. Gubeladze<sup>2</sup>

*Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000*

<sup>1</sup>*buba26021966@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0001-6018-4989, WoS ResearcherID: F-6921-201*

<sup>2</sup>*buba26021966@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-6966-6391, WoS ResearcherID: F-7215-2017*

*Received by the editorial office on 09/27/2022*

*After revision on 11/28/2022*

*Accepted for publication 12/06/2022*

*Abstract.* The article deals with one of the nuclear terrorism problem aspects, namely the attempts to implement “nuclear” blackmail by individual states. The possible destructive aircrafts impact to objects using atomic energy is considered. An express assessment of the guided air bomb strike result on the reinforced concrete object structure was carried out.

*Keywords:* nuclear terrorism, nuclear energy use facility, protective hermetic shell, aircraft, guided aerial bomb.

*For citation:* Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Substantiating the Need to Cover Atomic Energy Objects from Air Strikes // Global Nuclear Safety. 2022. Vol. 4(45). P. 15-24. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-02>

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

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING  
COMMISSIONING OF EQUIPMENT  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 539.1: 519.245  
DOI 10.26583/GNS-2022-04-03  
EDN CVJ TZH

**РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДОВ ПониЖЕНИЯ  
ДИСПЕРСИИ В ЗАДАЧЕ НА ГЛУБОКОЕ ПРОХОЖДЕНИЕ  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

© 2022 Богданова Екатерина Владимировна<sup>1</sup>, Тихомиров Георгий Валентинович<sup>2</sup>

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

<sup>1</sup>*evbogdanova@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8184-2124>*

<sup>2</sup>*GVTikhomirov@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5332-7272>*

*Аннотация.* В настоящее время существует проблема нехватки компьютерных мощностей для проведения высокоточного анализа реакторных установок. При моделировании полномасштабных моделей активных зон ядерных реакторов стохастическим методом Монте-Карло существует ряд факторов, увеличивающих чрезмерную вычислительную нагрузку и затрудняющих проведение расчетов. Среди них можно выделить наличие большого ослабления потока, которое наблюдается в задачах на глубокое прохождение излучения. Для повышения эффективности расчетов методом Монте-Карло используются различные техники понижения дисперсии, которые позволяют уменьшить статистическую неопределенность оценки функционала без увеличения числа моделируемых историй. Данная работа посвящена исследованию и тестированию методов понижения дисперсии в задаче на глубокое прохождение излучения. Сформулирована тестовая задача, решение которой позволит продемонстрировать возможность использования различных техник неаналогового моделирования. Для определения количественной эффективности применения методов понижения дисперсии рассматривается характеристика FOM, выступающая в роли функции от относительного отклонения оценки функционала и времени счета. В работе рассмотрены методы неаналогового моделирования, реализованные в программных комплексах MCU и OpenMC. В рамках исследования разработан модуль программы OpenMC, позволяющий автоматически генерировать значения весовых окон. Показано, что использование методов понижения дисперсии позволяет повысить эффективность расчета в несколько раз, в частности, с помощью метода весового окна в программе OpenMC удалось достичь повышения эффективности оценки потока нейтронов в 7 раз при неизменном количестве моделируемых историй. Сформулированные рекомендации в дальнейшем могут быть использованы при расчете полномасштабных моделей активных зон инновационных ядерных реакторов.

*Ключевые слова:* метод Монте-Карло, математическое моделирование, тестовая задача, глубокое прохождение излучения, неаналоговое моделирование, методы понижения дисперсии, метод расщепления/русская рулетка, метод весового окна, FOM, внешний источник.

*Для цитирования:* Богданова Е.В., Тихомиров Г.В. Результаты тестирования методов понижения дисперсии в задаче на глубокое прохождение излучения // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 25-39. <http://dx.doi.org/10.26583/GNS-2022-04-03>

Поступила в редакцию 14.09.2022

После доработки 17.11.2022

Принята к печати 29.11.2022

## Введение

Метод Монте-Карло является универсальным численным методом решения математических задач при помощи моделирования случайных величин. Поточечное представление взаимодействия нейтронов с веществом, а также отсутствие каких-либо приближений и аппроксимаций, делает метод Монте-Карло наиболее достоверным, распространенным и необходимым для решения задач переноса излучения. Являясь стохастическим методом расчета, метод Монте-Карло имеет статистический характер получаемых результатов, что влечет за собой необходимость моделирования большого числа историй для достижения приемлемой статистической неопределенности и приводит к ощутимым временам счета даже при использовании современных многопроцессорных вычислительных систем. Особо остро проблема неточности результата встает в задачах на глубокое прохождение излучения, как например, при расчетах защиты реакторных установок, и в задачах оценки функционалов в очень малых областях фазового пространства. В обоих случаях это связано с малой посещаемостью нейтронами рассматриваемых областей, где, соответственно, относительная статистическая неопределенность велика. В одной из работ Эдварда Ларсена [1] показано, насколько мала вероятность нейтрону источника долететь до детектора. Если принять, что число нейтронов, испускаемых источником, составляет  $10^{15}$ , и только  $10^8$  из них долетают до детектора, то в среднем только одна частица на миллион, смоделированных методом Монте-Карло, внесет вклад в оценку функционала в зоне детектора.

Полномасштабный высокоточный анализ объектов использования атомной энергии возможен при наличии достаточного количества вычислительных мощностей и объемов памяти [2]. Еще в 2003 г. Корд Смит сформулировал задачу расчета энерговыделения в ячейках полномасштабной модели реактора PWR при выгорании и выдвинул гипотезу, исходя из закона Мура, о том, что возможность рассчитать поставленную задачу на одном процессорном ядре менее чем за один час появится только после 2030 года [3]. Он также описал требования к расчету, а именно то, что стандартное отклонение энерговыделения в каждом твэле, разделенном на 100 аксиальных и 10 радиальных слоев, не должно превышать 1%. На основе этого в 2011 г. был запущен бенчмарк NEA OECD, основная цель которого заключается в отслеживании способности существующих программных средств и вычислительных мощностей производить расчеты полномасштабных активных зон с подробной оценкой энерговыделения в каждом твэле [4]. Большое количество ученых и специалистов на протяжении всего времени возвращаются к данной задаче [5-7]. Тем не менее, в настоящее время такая возможность отсутствует. На данный момент решение подобных задач и задач, где получение достоверного результата путем использования прямого аналогового моделирования трудно осуществимо, возможно только с использованием дополнительных техник и методик. Речь идет о методах понижения дисперсии.

Различные методы понижения дисперсии представляют собой альтернативные способы оценки рассматриваемых функционалов, при которых происходит увеличение точности расчета без увеличения производительности, или, другими словами, достижения желаемой точности с меньшими затратами на моделирование [8].

В настоящее время одним из важных направлений развития теории метода Монте-Карло является исследование и разработка определенных рекомендаций по применению методов понижения дисперсии в конкретных задачах [9]. Величина изменения дисперсии, помимо зависимости от изменения отклонения и мощности используемой вычислительной техники, во многом обусловлена опытом пользователя и способом приложения определенного метода. Некоторые методы могут уменьшить дисперсию в тысячи раз, некоторые на 10-15%, а некоторые, наоборот, повысить ее.

На сегодняшний день не существует определенного правила, следуя которому

можно было бы предсказать, на какую величину должно уменьшиться значение дисперсии, чтобы используемый метод считался эффективным. В некоторых случаях, улучшение на 10% дает ощутимую выгоду, в других же случаях 50-60 кратное ускорение расчета не оправдывает затрат на использование того или иного метода понижения дисперсии, как например, однократное вычисление, которое при прямом моделировании занимает 1 минуту, а в случае использования метода понижения дисперсии – 1 секунду. Отсюда следует необходимость принимать во внимание корреляцию времени счета, трудоемкости на реализацию техники понижения дисперсии и эффективности расчета.

Для определения количественной эффективности использования различных методов широко используется понятие относительной эффективности FOM – Figure of Merit. Figure of Merit является численной характеристикой, основанной на одном или нескольких параметрах системы или устройства, которая представляет собой меру эффективности и результативности. Первое упоминание Figure of Merit относится к 1865 г. [10].

При моделировании методом Монте-Карло под относительной эффективностью понимают величину, выступающую в роли функции от числа смоделированных историй [11, 12]:

$$FOM = \frac{1}{R^2 T}, \quad (1)$$

где  $R$  – относительное отклонение;

$T$  – время расчета в минутах, необходимое для моделирования заданного количества моделируемых историй.

Анализируя различные способы моделирования какого-либо рассматриваемого процесса, необходимо опираться на наибольшее значение FOM, которое характеризует наиболее эффективный способ, так как требует наименьшего затрачиваемого времени для достижения указанной относительной погрешности расчета [13].

Оценка эффективности различных техник и методов моделирования возможна с помощью тестовых задач. Тесты позволяют определить способность или неспособность программного кода к расчетам определенного типа, осуществлять верификацию и валидацию существующих и разрабатываемых программных средств, техник и методик. Что, в свою очередь, является неотъемлемой составляющей анализа безопасности ядерных энергетических установок.

В данной работе разработана тестовая задача для проверки эффективности использования методов понижения дисперсии при решении задач на глубокое прохождение излучения.

### **Тестовая задача на глубокое прохождение излучения**

Разрабатываемая в данной работе тестовая задача относится к проблеме сильного ослабления потока или так называемое глубокое прохождение излучения. В литературе не существует четкого определения понятия глубокого прохождения излучения, особенно не определено, что подразумевается под глубоким прохождением, а что под неглубоким. Однако различные источники сходятся в том, что проблема глубокого прохождения излучения характеризуется ослаблением потока на несколько порядков [14, 15]. При этом исследования показывают, что ослабление на 3-5 порядков уже является значимым при оценке функционалов. Особенно проблема сильного ослабления нейтронного потока является принципиальной при расчете защиты ядерных установок, где наблюдается 7-10 порядков ослабления потока.

С целью рассмотрения данной проблемы сформулирована простая классическая задача расчета плотности потока нейтронов на некотором расстоянии от точечного

источника в бетонном блоке [16].

Расчетная модель представляет собой цилиндр высотой 180 см и радиусом 100 см. Данный блок разделен на 18 регистрационных областей толщиной 10 см каждая. На границе первого регистрационного объекта располагается точечный изотропный источник. Энергия нейтронов источника распределяется следующим образом: 25% нейтронов с энергией 2 МэВ, 50 % с энергией 14 МэВ, 25 % рождаются с энергией, равномерно распределенной между 2 МэВ и 14 МэВ. Материал блока – реакторный бетон, плотностью 2,03 г/см<sup>3</sup>. Материал, используемый в данной модели, является идеальной защитой, трудной для прохождения нейтронов. Изотопный состав реакторного бетона представлен в таблице 1. Расчетная модель с указанием номера регистрационных областей, представлена на рисунке 1.

Таблица 1 – Изотопный состав материала, используемого в тестовой задаче [Material isotopic composition used in the test task]

Нуклиды	Атомная доля
<sup>1</sup> H	0,010
<sup>16</sup> O	0,529
<sup>23</sup> Na	0,016
Mg	0,002
<sup>27</sup> Al	0,034
Si	0,337
K	0,013
Ca	0,044
Fe	0,014
<sup>12</sup> C	0,001

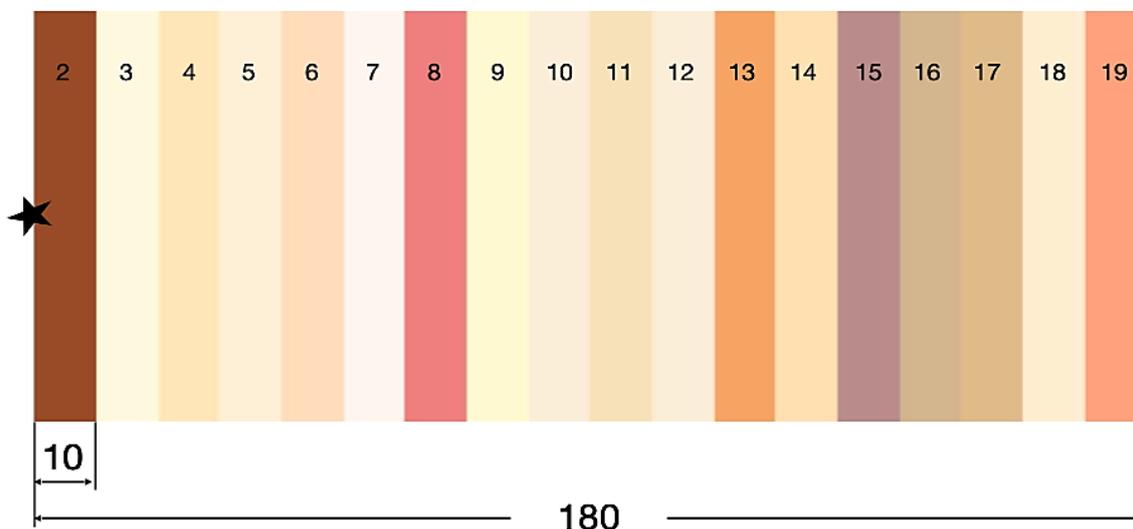


Рисунок 1 – Расчетная модель тестовой задачи с точечным источником на границе [Model of the test task with a point source at the boundary]

Целью данной задачи является расчет интегрального по объему потока нейтронов в регистрационных объектах, отмеченных на рисунке 1. Ее решение позволит продемонстрировать как применение различных методов понижения дисперсии может повысить эффективность данного типа расчета.

### Методы понижения дисперсии

В работе проведено тестирование методов понижения дисперсии, реализованных в программных комплексах MCU (Monte Carlo Universal) [17] и OpenMC [18].

В программном комплексе MCU существует возможность использования метода расщепления/рулетки. В свою очередь в программе OpenMC в настоящее время реализованы метод неявного захвата и метод весового окна.

Метод расщепления/рулетка подразумевает разбиение фазового пространства на непересекающиеся геометрические или энергетические зоны. Каждой зоне приписывается вес  $W > 0$  и характерная величина – ценность, обратно пропорциональная весу:

$$V = \frac{1}{W}. \quad (2)$$

При переходе частицы с весом  $w$  из одной геометрической зоны в другую ( $W_i \rightarrow W_j$ ) или при пересечении границы отрезка энергии после рассеяния, происходит расщепление/рулетка, после чего с некой вероятностью образуются частицы, имеющие вес  $w'$ :

$$w' = \frac{w}{\left(\frac{W_i}{W_j}\right)}. \quad (3)$$

Для непосредственного моделирования метода расщепления по геометрии/рулетка в программе MCU во входном файле задаются значения ценностей регистрационных областей.

Метод неявного захвата, реализованный в программе OpenMC, подразумевает при каждом столкновении частицы с ядром замену вероятности возникновения поглощения на вероятность рассеяния. При этом вес частицы уменьшается на значение, равное вероятности возникновения поглощения [17]:

$$w' = w \left(1 - \frac{\sigma_a}{\sigma_t}\right), \quad (4)$$

где  $\sigma_a$  – сечение поглощения;

$\sigma_t$  – полное сечение взаимодействия.

Метод неявного захвата уменьшает вес частиц, что может привести к очень низким значениям. В связи с этим данная опция всегда используется в сочетании с методом рулетки. Пользователю, после включения опции метода неявного захвата, необходимо задать два параметра – вес частиц ( $w_c$ ), ниже которого применяется рулетка, и вес, который будет присвоен выжившим частицам ( $w'$ ).

Метод весового окна позволяет увеличить количество моделируемых частиц в интересующих пользователя геометрических областях или диапазонах энергий. Для этого определяется верхняя и нижняя граница веса частиц, пересечение которых влечет за собой расщепление или рулетку. Если вес частиц, попадающих в рассматриваемую геометрическую/энергетическую область выше верхней границы, то происходит расщепление на  $N$  частиц по правилу [18]:

$$N = \min(N_{max}, \left\lceil \frac{w}{w_u} \right\rceil), \quad (5)$$

где  $N_{max}$  – максимальное значение возможного расщепления, задаваемое пользователем;

$w$  – исходный вес частицы;

$w_u$  – верхняя граница.

Если вес частицы меньше указанной нижней границы, то выжившим после ролетки нейтронам присваивается вес:

$$w_s = \min(N_{max}w, f_s w_l), \quad (6)$$

где  $w_l$  – нижняя граница;

$f_s$  – коэффициент веса выживания, превышающий 1, который определяется пользователем.

Наибольшие трудности при использовании метода весового окна вызывает подбор используемых параметров, а именно ширина окна и вес частиц после расщепления. В программах MCNP [19, 20] и Serpent [21] реализованы генераторы весовых окон, которые автоматически подбирают параметры моделирования. В OpenMC существует возможность импортирования сгенерированных в MCNP весовых окон, однако в данной работе такая возможность не рассмотрена.

В работе рассмотрены три альтернативы генератора весовых окон. Первый вариант заключается в эмпирическом исследовании рассматриваемой проблемы. Проведен анализ влияния задаваемых пользователем параметров моделирования на эффективность расчета.

Следующий возможный вариант получения весовых окон основывается на глобальном методе понижения дисперсии [22-24], в котором нижняя граница весового окна ( $w_l$ ) для каждой  $i$ -ой ячейки определяется через поток нейтронов ( $\varphi_i$ ) и максимальное значение потока нейтронов в рассматриваемой модели ( $\max(\varphi_i)$ ):

$$w_l = C \frac{\varphi_i}{\max(\varphi_i)}, \quad (7)$$

где  $C$  – константа. В программе MCNP значение константы по умолчанию принимается равным 1/3. Зная нижнюю границу весового окна, получаем верхнюю границу, учитывая рекомендации [25]:

$$w_l = 5 \cdot w_u. \quad (8)$$

В данной работе был написан модуль на языке Python, позволяющий генерировать весовые окна в программе OpenMC на основе вышеизложенных утверждений. Разработанный модуль путем одного запуска позволяет провести прямой аналоговый расчет, сгенерировать весовые окна и использовать их в неналоговом моделировании. При этом значение константы определяется из наиболее эффективного расчета с максимальным значением FOM.

Также рассмотрен метод генерации весовых окон через функцию ценности, описываемую дифференциальными уравнениями, которые характеризует частицы, движущиеся в положительном/отрицательном направлении. Необходимо отметить, что данный способ генерации весовых окон возможен только в простой одномерно-двумерной геометрии, при этом деление модели на ячейки должно быть равномерным. В таком случае, ценность, описывающая положительное направление движения частиц –  $N(x)$ , и ценность обратного направления движения частиц –  $L(x)$ , определяются уравнениями:

$$\frac{dN}{dx} = (\sigma - \sigma_s f)N(x) - \sigma_s r L(x), \quad (9)$$

$$\frac{dL}{dx} = (\sigma - \sigma_s f)N(x) + \sigma_s r N(x), \quad (10)$$

где  $f$  – вероятность рассеяния в прямом направлении;  
 $r$  – вероятность рассеяния в обратном направлении;  
 $\sigma$  – полное сечение;  
 $\sigma_s$  – сечение рассеяния.

При этом граничные условия:

$$N(x_{max}) = 1, \quad (11)$$

$$L(0) = 0. \quad (12)$$

Таким образом, найдя решение дифференциального уравнения, определяем нижнюю границу весового окна обратно пропорционально ценности, верхняя граница определяется уравнением (8). В рамках исследования в программу OpenMC была добавлена функция расчета описанных дифференциальных уравнений, с помощью которых определяются параметры моделирования.

### Аналоговое моделирование Монте-Карло

Рассмотрена возможность оценки интегрального по объему потока нейтронов в регистрационных объектах исследуемой тестовой задачи прямым аналоговым Монте-Карло методом по программам MCU и OpenMC. В каждой программе смоделировано 20 млн нейтронных историй. Результаты расчета интегрального по объему потока нейтронов в тестовой модели прямым аналоговым методом Монте-Карло представлены на рисунке 2. На рисунке 3 показана эффективность расчета – параметр FOM, и относительное отклонение потока нейтронов в рассматриваемых регистрационных объектах.

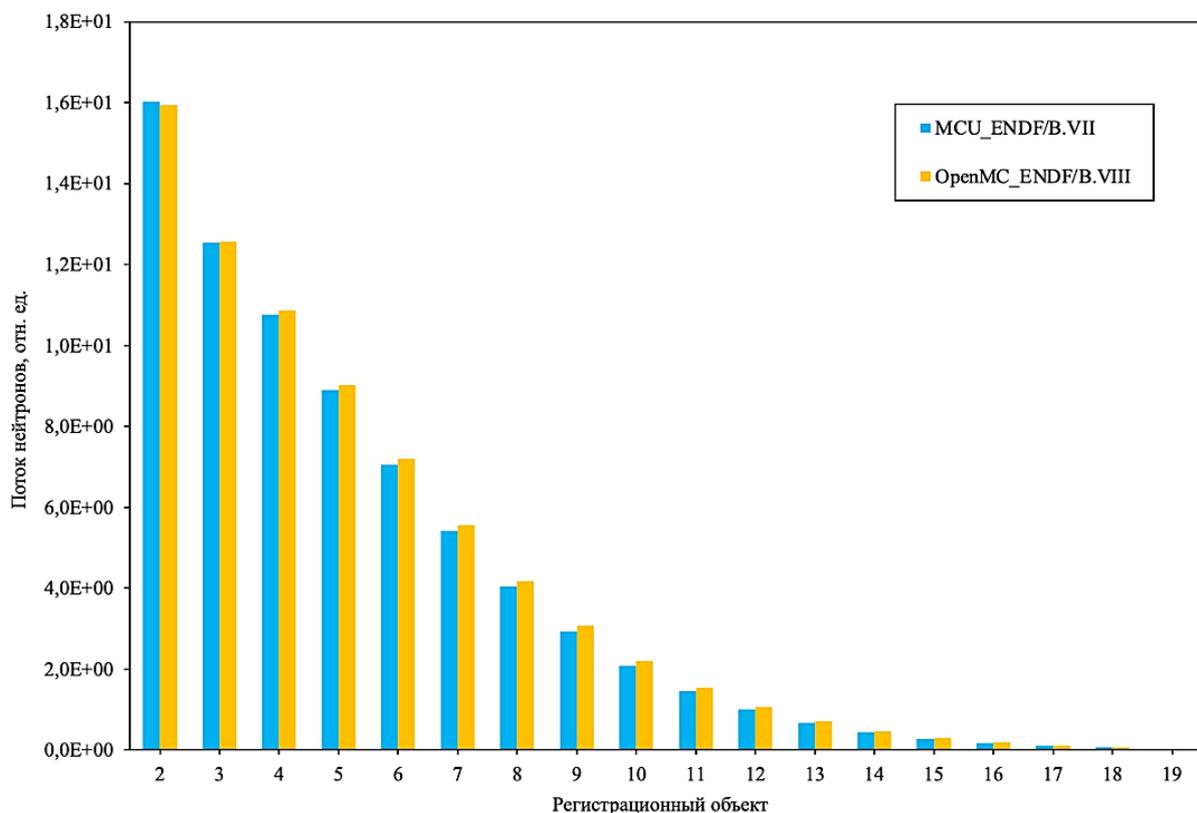


Рисунок 2 – Результаты расчета интегрального по объему потока нейтронов в тестовой модели прямым аналоговым методом Монте-Карло [Calculation results of the volume-integrated neutron flux in the test model by analog Monte Carlo method]

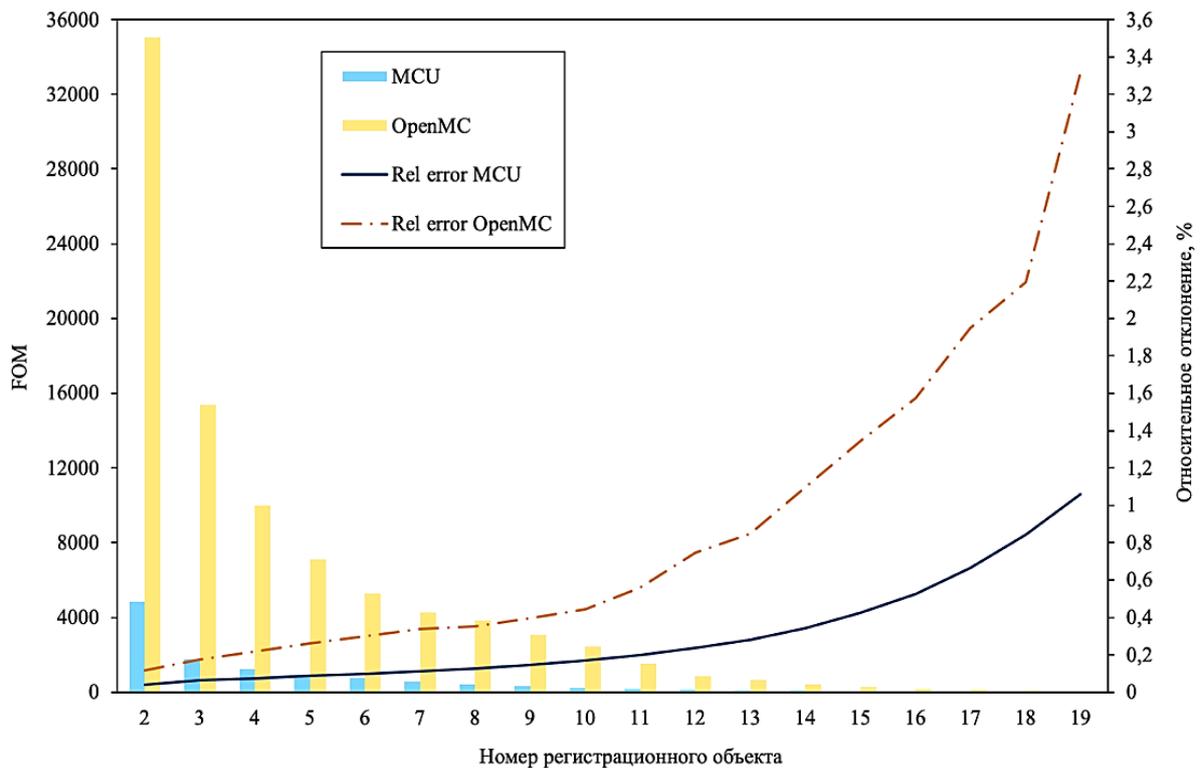


Рисунок 3 – Эффективность расчета и относительное отклонение интегрального по объему потока нейтронов в тестовой модели при прямом аналоговом моделировании [FOM and relative error of the volume-integrated neutron flux in the test model using the analog modeling]

Результаты оценки функционала показывают наличие ослабления потока нейтронов на 3 порядка. Видно, что с увеличением расстояния от источника, эффективность расчета уменьшается в сотни раз. При этом относительное отклонение оцениваемого функционала увеличивается в десятки раз.

Данные, полученные по двум программам, имеют расхождения, особенно наиболее ярко выраженные в регистрационных областях с наибольшим статистическим отклонением. Несоответствие объясняется использованием разных библиотек ядерных констант. Также стоит отметить высокую производительность программы OpenMC, расчет по которой осуществляется в несколько раз быстрее, что в свою очередь отражается на функционале FOM. Причиной этого служит реализация программ на разных языках программирования, отличающихся между собой быстродействием, а также способами подключения библиотек и распараллеливанием кодов.

### Неаналоговое моделирование

В данном разделе представлены результаты тестирования методов понижения дисперсии в тестовой задаче на глубокое прохождение излучения.

Показано, что использование опции расщепления/рулетка в программном комплексе MCU позволяет повысить эффективность оценки функционала – интегрального по объему потока нейтронов, в наиболее удаленном от источника объекте больше, чем в 2,5 раза (табл. 2). При этом относительное отклонение рассматриваемого функционала снизилось до 0,1 %, что практически в 10 раз меньше, чем при прямом аналоговом моделировании.

Таблица 2 – Результаты расчета тестовой задачи на глубокое прохождение излучения в программе MCU с использованием опции расщепления/русская рулетка [Calculation results of the deep penetration problem using the splitting/russian roulette method in MCU]

№ объекта	$\Phi^{S/RR}_{MCU}$ , отн. ед	$\sigma^{S/RR}_{MCU}$ , %	FOM <sup>S/RR</sup> <sub>MCU</sub>	FOM <sup>analog</sup> <sub>MCU</sub>
2	1,61E+01	0,12	11,37	4819,74
3	1,26E+01	0,17	5,97	1763,71
4	1,08E+01	0,21	3,67	1214,79
5	8,82E+00	0,19	4,59	887,00
6	6,96E+00	0,16	6,58	748,19
7	5,32E+00	0,17	5,52	573,82
8	3,94E+00	0,16	6,17	433,54
9	2,85E+00	0,16	6,62	336,68
10	2,01E+00	0,16	6,60	240,85
11	1,39E+00	0,15	7,34	174,47
12	9,43E-01	0,14	7,98	125,66
13	6,28E-01	0,13	9,22	88,43
14	4,11E-01	0,12	11,37	58,23
15	2,64E-01	0,11	13,18	38,21
16	1,65E-01	0,10	15,33	25,04
17	1,00E-01	0,10	17,40	15,65
18	5,60E-02	0,10	17,34	9,68
19	2,37E-02	0,10	17,14	6,14
Время расчета, сек.	60420,00		1450,20	

В ходе тестирования метода неявного захвата в программе OpenMC было проведено исследование влияния задаваемых пользователем параметров на эффективность расчета. На рисунке 4 представлена зависимость относительного отклонения потока нейтронов, рассчитанного в 19 регистрационном объекте (наиболее удаленный от источника объект), от используемых параметров моделирования. Анализ полученных результатов позволяет сформулировать рекомендации, а именно: наибольшая эффективность расчета интегрального по объему потока нейтронов наблюдается при использовании  $w_c = 0,1$  и  $w' = 1,0$ .

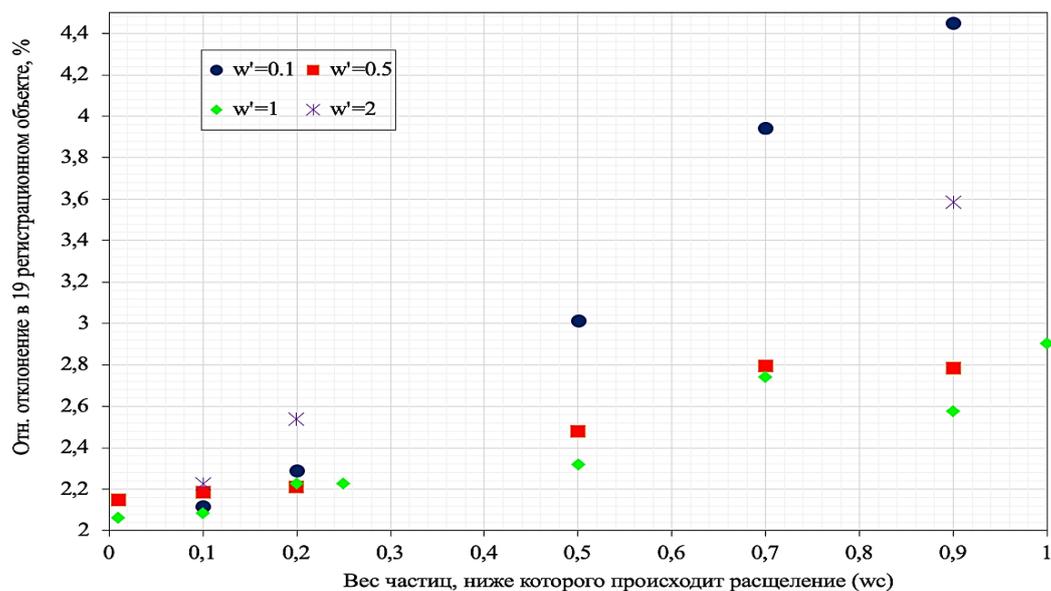


Рисунок 4 – Зависимость относительного отклонения потока нейтронов, рассчитанного в 19 регистрационном объекте, от заданных параметров опции неявного захвата [Dependence of the neutron flux relative error calculated in 19th object on the specified parameters of the survival biasing]

Результаты расчета рассматриваемой тестовой задачи с использованием техники неявного захвата в программе OpenMC представлены в таблице 3. Показано, что эффективность оценки плотности потока нейтронов на расстоянии 180 см от точечного источника с использованием метода неявного захвата в программе OpenMC увеличивается в два раза. Стоит отметить, что рассмотренный метод предназначен для моделирования сильно поглощающих сред. Это объясняет довольно малый выигрыш в эффективности расчета по сравнению с прямым аналоговым моделированием. В отличие от метода неявного захвата, метод весового окна разработан непосредственно для задач на глубокое прохождение излучения.

Таблица 3 – Результаты расчета тестовой задачи на глубокое прохождение излучения в программе OpenMC с использованием техники неявного захвата [Calculation results of the deep penetration problem using the survival biasing method in OpenMC]

№ объекта	$\Phi^{H.3.}_{OpenMC}$ , отн. ед	$\sigma^{H.3.}_{OpenMC}$ , %	FOM <sup>H.3.</sup> <sub>OpenMC</sub>	FOM <sup>analog</sup> <sub>OpenMC</sub>
2	1,59E+01	0,10	36206,68	35041,3
3	1,25E+01	0,17	12582,69	15354,5
4	1,08E+01	0,19	10234,04	10007,2
5	9,00E+00	0,24	6701,56	7118,3
6	7,19E+00	0,27	5227,78	5298,3
7	5,55E+00	0,31	3948,61	4245,3
8	4,17E+00	0,33	3407,08	3809,8
9	3,05E+00	0,39	2562,06	3073,3
10	2,18E+00	0,44	1943,23	2452,1
11	1,53E+00	0,47	1703,55	1531,6
12	1,05E+00	0,57	1188,89	859,9
13	7,11E-01	0,67	836,69	663,3
14	4,75E-01	0,79	609,54	396,8
15	3,11E-01	0,98	394,25	264,5
16	1,99E-01	1,22	256,18	192,4
17	1,21E-01	1,30	226,45	125,5
18	7,11E-02	1,74	125,50	99,3
19	3,03E-02	2,08	87,61	43,4
Время расчета, сек.	26,32		20,94	

При использовании метода весового окна в программе OpenMC рассмотрены три варианта генерации весовых окон. Метод весового окна с эмпирически подобранными характеристиками позволяет повысить эффективность расчета потока нейтронов в максимально отдаленном от точечного источника объекте больше, чем в 2,5 раза. Результаты проведенного исследования представлены в таблице 4. Необходимо подчеркнуть, что дисперсия оцениваемого функционала в 19 регистрационном объекте достигла 0,32 %, что в 10 раз ниже статистической неопределенности в прямом аналоговом моделировании. Однако, прямой подбор параметров моделирования является трудозатратным, что делает данный способ не столь эффективным.

Таблица 4 – Результаты расчета тестовой задачи на глубокое прохождение излучения в программе OpenMC с использованием техники весового окна с эмпирически подобранными параметрами моделирования [Calculation results of the deep penetration problem using the weight windows method with empirically selected parameters in OpenMC]

№ объекта	$\Phi^{ww1}_{OpenMC}$ , отн. ед	$\sigma^{ww1}_{OpenMC}$ , %	FOM <sup>ww1</sup> <sub>OpenMC</sub>	FOM <sup>analog</sup> <sub>OpenMC</sub>
2	1,59E+01	0,09	1421,06	35041,3
3	1,26E+01	0,11	992,37	15354,5
4	1,09E+01	0,11	863,12	10007,2
5	9,00E+00	0,11	868,12	7118,3
6	7,18E+00	0,12	807,34	5298,3
7	5,54E+00	0,12	795,21	4245,3
8	4,16E+00	0,12	771,91	3809,8
9	3,04E+00	0,12	769,98	3073,3
10	2,18E+00	0,12	807,29	2452,1
11	1,53E+00	0,13	695,23	1531,6
12	1,05E+00	0,14	585,60	859,9
13	7,09E-01	0,15	511,87	663,3
14	4,70E-01	0,16	457,56	396,8
15	3,06E-01	0,17	396,12	264,5
16	1,95E-01	0,19	323,31	192,4
17	1,20E-01	0,21	244,98	125,5
18	6,75E-02	0,24	198,36	99,3
19	2,89E-02	0,32	112,33	43,4
Время расчета, сек.	890,57		20,94	

Результаты расчета тестовой задачи с использованием параметров весового окна, рассчитанных по разработанному модулю через максимальный поток нейтронов представлены в таблице 5. Стоит отметить, что в приведенных результатах расчета эффективность метода весового окна оценивается без учета времени подготовки параметров моделирования, как и во всех других рассматриваемых случаях. Написанный модуль позволяет автоматизировать генерацию весовых окон, а подобранное значение константы может быть использовано в других задачах на глубокое прохождение излучения. Рекомендовано использовать коэффициент  $C = 0,5$ . Данный метод позволяет повысить эффективность расчета потока нейтронов в максимально удаленном от источника объекте больше, чем в 7 раз. При этом удастся понизить дисперсию расчета до 0,58 %, что практически в 6 раз ниже, чем при прямом аналоговом моделировании.

Таблица 5 – Результаты расчета тестовой задачи на глубокое прохождение излучения в программе OpenMC с использованием техники весового окна с параметрами моделирования, рассчитанными через максимальный поток нейтронов [OpenMC calculation results of the deep penetration problem using the weight windows method with parameters calculated in terms of the maximum neutron flux]

№ объекта	$\Phi^{ww2}_{OpenMC}$ , отн. ед	$\sigma^{ww2}_{OpenMC}$ , %	FOM <sup>ww2</sup> <sub>OpenMC</sub>	FOM <sup>analog</sup> <sub>OpenMC</sub>
2	1,59E+01	0,12	8025,17	35041,3
3	1,26E+01	0,17	3986,95	15354,5
4	1,09E+01	0,22	2287,47	10007,2
5	9,02E+00	0,23	2013,67	7118,3
6	7,20E+00	0,27	1470,63	5298,3
7	5,57E+00	0,29	1272,08	4245,3
8	4,17E+00	0,30	1210,77	3809,8
9	3,05E+00	0,33	994,65	3073,3

Продолжение таблицы 5

№ объекта	$\Phi^{ww^2}_{OpenMC}$ , отн. ед	$\sigma^{ww^2}_{OpenMC}$ , %	FOM <sup>ww<sup>2</sup></sup> <sub>OpenMC</sub>	FOM <sup>analog</sup> <sub>OpenMC</sub>
11	1,53E+00	0,37	823,82	1531,6
12	1,06E+00	0,37	788,93	859,9
13	7,11E-01	0,42	620,82	663,3
14	4,71E-01	0,44	578,44	396,8
15	3,07E-01	0,45	534,61	264,5
16	1,96E-01	0,49	457,93	192,4
17	1,20E-01	0,52	407,16	125,5
18	6,80E-02	0,56	348,94	99,3
19	2,92E-02	0,58	322,25	43,4
Время расчета, сек.	91,07		20,94	

Также в данной работе рассмотрен метод генерации весовых окон через функцию ценности, описываемую дифференциальными уравнениями. Проведенный анализ показал, что эффективность данного метода, а именно параметр FOM, сравнима с эффективностью аналогового моделирования. Однако с его помощью удалось достигнуть понижения дисперсии до 0,48 %, что практически в 7 раз ниже, чем в прямом аналоговом Монте-Карло методе. Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчета тестовой задачи на глубокое прохождение излучения в программе OpenMC с использованием техники весового окна с параметрами моделирования, рассчитанными через дифференциальные уравнения [OpenMC calculation results of the deep penetration problem using the weight windows method with parameters calculated via differential equations]

№ объекта	$\Phi^{ww^3}_{OpenMC}$ , отн. ед	$\sigma^{ww^3}_{OpenMC}$ , %	FOM <sup>ww<sup>3</sup></sup> <sub>OpenMC</sub>	FOM <sup>analog</sup> <sub>OpenMC</sub>
2	1,59E+01	0,09	1080,83	35041,3
3	1,26E+01	0,11	694,05	15354,5
4	1,09E+01	0,12	622,19	10007,2
5	9,01E+00	0,12	645,32	7118,3
6	7,19E+00	0,13	560,30	5298,3
7	5,55E+00	0,13	548,06	4245,3
8	4,16E+00	0,13	527,27	3809,8
9	3,05E+00	0,13	528,60	3073,3
10	2,18E+00	0,13	497,69	2452,1
11	1,53E+00	0,14	467,84	1531,6
12	1,05E+00	0,15	367,81	859,9
13	7,09E-01	0,17	292,67	663,3
14	4,70E-01	0,21	194,40	396,8
15	3,06E-01	0,23	161,12	264,5
16	1,95E-01	0,27	120,57	192,4
17	1,20E-01	0,33	79,44	125,5
18	6,78E-02	0,41	53,35	99,3
19	2,91E-02	0,48	38,09	43,4
Время расчета, сек.	1134,10		20,94	

### Заключение

В данной работе проведено исследование возможности использования методов понижения дисперсии в задаче на глубокое прохождение излучения. Протестирована техника расщепления/рулетка в программе MCU, и методы неявного захвата и весового окна в программе OpenMC. Сформулированы рекомендации по использованию

рассмотренных методов, в том числе определены оптимальные параметры моделирования. Для метода весового окна рассмотрены три варианта генерации весовых окон.

Показано, что при правильном использовании методы понижения дисперсии могут значительно повысить эффективность расчетов. Наибольший выигрыш использования неаналогового моделирования достигается при применении метода весового окна с параметрами, рассчитанными через максимальное значение интегрального по объему потока нейтронов. Максимальная достигнутая эффективность оценки потока нейтронов на расстоянии 180 см от точечного источника превышает эффективность прямого Монте-Карло метода в 7 раз.

Рекомендации по проведению нейтронно-физических расчетов неаналоговым моделированием Монте-Карло могут быть использованы для повышения эффективности расчетов инновационных ядерных реакторов.

#### *Источник финансирования*

*Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0016) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Edward W. Larsen* (2006) An Overview of Neutron Transport Problems and Simulation Techniques. In: *Graziani F.* (eds) Computational Methods in Transport. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, vol 48. Springer, Berlin, Heidelberg.
2. *Paul Kollath Romano*. Parallel Algorithms for Monte Carlo Particle Transport Simulation on Exascale Computing Architectures. Massachusetts Institute of Technology, – 2013.
3. *Kord Smith*, «Reactor Core Methods», Invited lecture at the M&C 2003 International Conference, April 6-10, 2003, Gatlinburg, TN, USA, 2003.
4. *Чистяков, В.П.* Курс теории вероятностей / В.П. Чистяков. – Москва : Наука, 1982.
5. *W.R. MARTIN*, «Advances in Monte Carlo Methods for Global Reactor Analysis», Proc. Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications, Monterey, California, April 15–19, 2007, Invited Lecture.
6. *D. Legrady, A. Claret, B. Molnar, G. Tolnai*, Verification of the interaction physics of GUARDYAN a novel GPU-based Monte Carlo code for short scale reactor transients, in Proceedings of the PHYSOR, Reactor Physics Paving the Way Towards More Efficient Systems (Cancun, Mexico, 2018), p. 2018.
7. *Gross, R., Tomatis, D. & Gilad, E.* High-accuracy neutron diffusion calculations based on integral transport theory. Eur. Phys. J. Plus 135, 235 (2020).
8. *Kleijnen, J.P.C.* Statistical Techniques in Simulation, Part 1. Marcel Dekker, New York (1974).
9. *Кольчужкин, А.М.* Введение в теорию прохождения частиц через вещество / А.М. Кольчужкин, В.В. Учайкин. – Москва : Атомиздат, 1978, – 256 с.
10. *Figure of merit*. Merriam-Webster.com Dictionary, Merriam-Webster [Электронный ресурс]. – URL : <https://www.merriam-webster.com/dictionary/figure%20of%20merit> (дата обращения: 26.02.2021).
11. «MCNPTM—A General Purpose Monte Carlo N-Particle Transport Code», Version 4C, LA-13709-M, J. F. BRIESMEISTER, Ed. (Dec. 2000).
12. *S.P. Pederson, R.A. Forster, and T.E. Booth*. Confidence Interval Procedures for Monte Carlo Transport Simulations. Nucl. Sci. Eng., 127, 54 (1997).
13. *J. Kenneth Shultis and Richard E. Faw*. An MCNP Primer. Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University. December, 2011.
14. *S.N. Cramer, J.S. Tang*. Variance reduction methods applied to deep-penetration Monte Carlo problems. Engineering Physics and Mathematics Division. ORNL/TM-9643, DE86 007080, 1986.
15. *Суслов, И.П.* Гибридный метод расчета защиты ЯЭУ / И.П. Суслов, И.А. Лямцев // Препринт ФЭИ-3267. – Обнинск, 2016. – 15 с.
16. *Thomas E. Booth*. A sample problem for variance reduction in MCNP. Technical Report, Los Alamos National Laboratory, LA-10363-MS, 1985.
17. *Статус MC-5* / Н.И. Алексеев, С.Н. Большагин, Е.А. Гомин [др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2011. – № 4. – С. 4-23.
18. *Paul K. Romano and Benoit Forget*, «The OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code», Ann.

- Nucl. Energy, 51, 274-281 (2013).
19. *Cristian G. Bucher*. Adaptive sampling – an iterative fast Monte Carlo procedure. *Structural Safety*, (1998), Volume 5, pp. 119-126.
  20. *Booth, T.E. and J.S. Hendricks* (1984), Importance Estimation in Forward Monte Carlo Calculations, *Nucl. Techno U Fusion*, 5, p. 90.
  21. *Leppänen, J., et al.* (2015) «The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013». *Ann. Nucl. Energy*, 82 (2015) 142-150.
  22. *Cooper, M.A., Larsen, E.W.* Automated weight windows for global Monte Carlo particles transport calculations. *Nuclear Science and Engineering*, 137, 1–13, 2001.
  23. *A.J. van Wijk, G. Van den Eynde, J.E. Hoogenboom*. An easy to implement global variance reduction procedure for MCNP. *Annals of Nuclear Energy* 38 (2011) 2496-2503.
  24. *Yuan Hu, Sha Yan, Yuefeng Qiu, Yu Zheng*. Implementation and benchmarking of an automatic global variance reduction method on OpenMC. *Fusion Engineering and Design*, Volume 173, 2021, 112829.
  25. *Christopher N. Culberts, John S. Hendricks*. An Assessment of the MCNP4C Weight Window. LA-13668, 1999.

## REFERENCES

- [1] Edward W. Larsen (2006) An Overview of Neutron Transport Problems and Simulation Techniques. In: Graziani F. (eds) *Computational Methods in Transport*. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, vol 48. Springer, Berlin, Heidelberg (in English).
- [2] Paul Kollath Romano. *Parallel Algorithms for Monte Carlo Particle Transport Simulation on Exascale Computing Architectures*. Massachusetts Institute of Technology, – 2013 (in English).
- [3] Kord Smith, «Reactor Core Methods». Invited lecture at the M&C 2003 International Conference, April 6-10, 2003, Gatlinburg, TN, USA, 2003 (in English).
- [4] Chistyakov V.P. *Kurs teorii veroyatnostej [Course of Probability Theory]*. Moscow: Nauka, 1982 (in Russian).
- [5] W. R. MARTIN, «Advances in Monte Carlo Methods for Global Reactor Analysis». Proc. Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications, Monterey, California, April 15-19, 2007, Invited Lecture (in English).
- [6] D. Legrady, A. Claret, B. Molnar, G. Tolnai, Verification of the Interaction Physics of GUARDYAN a Novel GPU-based Monte Carlo Code for Short Scale Reactor Transients, in Proceedings of the PHYSOR, Reactor Physics Paving the Way Towards More Efficient Systems (Cancun, Mexico, 2018), p. 2018 (in English).
- [7] Gross R., Tomatis D. & Gilad E. High-accuracy neutron diffusion calculations based on integral transport theory. *Eur. Phys. J. Plus* 135, 235 (2020) (in English).
- [8] Kleijnen, J.P.C. *Statistical Techniques in Simulation, Part 1*. Marcel Dekker, New York (1974) (in English).
- [9] Kolchuzhkin A.M., Uchaikin V.V., *Vvedenie v teoriyu prohozhdeniya chastic cherez veshchestvo [Introduction to the Theory of the Passage of Particles through matter]*. Moscow: Atomizdat, 1978, 256 p. (in Russian).
- [10] Figure of Merit. Merriam-Webster.com Dictionary, Merriam-Webster [Electronic resource]. – URL: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/figure%20of%20merit> (date of the application: 26.02.2021) (in English).
- [11] «MCNPTM—A General Purpose Monte Carlo N-Particle Transport Code». Version 4C, LA-13709-M, J. F. BRIESMEISTER, Ed. (Dec. 2000) (in English).
- [12] S. P. Pederson, R. A. Forster, and T. E. Booth. Confidence Interval Procedures for Monte Carlo Transport Simulations. *Nucl. Sci. Eng.*, 127, 54 (1997) (in English).
- [13] J. Kenneth Shultis and Richard E. Faw. *An MCNP Primer*. Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University. December, 2011 (in English).
- [14] S.N. Cramer, J.S. Tang. Variance Reduction Methods Applied to Deep-Penetration Monte Carlo Problems. Engineering Physics and Mathematics Division. ORNL/TM-9643, DE86 007080, 1986 (in English).
- [15] Suslov I.R., Lyamtsev I.A. *Gibridnyĭ Metod Rascheta Zashchity YAEU [Hybrid Method Of Calculating The Protection Of Nuclear Power Plants]*, FEI-3267 Preprint. Obninsk, 2016, 15 p. (in Russian).
- [16] Thomas E. Booth. A Sample Problem for Variance Reduction in MCNP. Technical Report, Los Alamos National Laboratory, LA-10363-MS, 1985 (in English).
- [17] Alekseev N.I., Bolshagin S.N., Gomin E.A., Gorodkov S.S., Gurevich M.I., Kalugin M.A., Kulakov A.S., Marin S.V., Novoseltsev, A.P., Oleinik D.S., Pryanichnikov A.V., Sukhino-Khomenko E.A., Shkarovsky D.A., Yudkevich M.S. Status MC–5 [Status MCU–5], *Voprosy atomnoj nauki i*

- tekhniki. Ser.: Fizika yadernyh reaktorov [Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Physics of Nuclear Reactors], 2011, 4, pp. 4-23 (in Russian).
- [18] Paul K. Romano and Benoit Forget, «The OpenMC Monte Carlo Particle Transport Code». Ann. Nucl. Energy, 51, 274–281 (2013) (in English).
- [19] Cristian G. Bucher. Adaptive Sampling – an Iterative Fast Monte Carlo Procedure. Structural Safety, (1998), Volume 5, pp. 119-126 (in English).
- [20] Booth, T.E. and J.S. Hendricks (1984), Importance Estimation in Forward Monte Carlo Calculations, Nucl. Techno U Fusion, 5, p. 90 (in English).
- [21] Leppänen, J., et al. (2015) «The Serpent Monte Carlo code: Status, Development and Applications in 2013». Ann. Nucl. Energy, 82 (2015) 142-150 (in English).
- [22] Cooper, M.A., Larsen, E.W. Automated Weight Windows for Global Monte Carlo particles Transport Calculations. Nuclear Science and Engineering, 137, 1-13, 2001 (in English).
- [23] A.J. van Wijk, G. Van den Eynde, J.E. Hoogenboom. An Easy to Implement Global Variance Reduction Procedure for MCNP. Annals of Nuclear Energy 38 (2011) 2496–2503 (in English).
- [24] Yuan Hu, Sha Yan, Yuefeng Qiu, Yu Zheng. Implementation and Benchmarking of an Automatic Global Variance Reduction Method on OpenMC. Fusion Engineering and Design, Volume 173, 2021, 112829 (in English).
- [25] Christopher N. Culberts, JohnS. Hendricks. An Assessment of the MCNP4C Weight Window. LA-13668, 1999 (in English).

## Test Results of Variance Reduction Techniques Applied to Deep Penetration Problem

Ekaterina V. Bogdanova<sup>1</sup>, Georgiy V. Tikhomirov<sup>2</sup>

National Research Nuclear University (MEPhI), Kashirskoyeshosse, 31, Moscow, Russia 1154091  
<sup>1</sup>evbogdanova@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-8184-2124, WoSResearcher ID: P-1554-2017  
<sup>2</sup>GVTikhomirov@mephi.ru, ORCID iD: 0000-0002-5332-7272, WoSResearcher ID: B-7860-2013

*Received by the editorial office on 09/14/2022*

*After revision on 11/17/2022*

*Accepted for publication 11/29/2022*

*Abstract.* Nowadays, there is a problem of a lack of computer power to conduct high-precision reactor analysis. There are several factors that increase the excessive computational load and make it difficult to calculate nuclear reactor full-scale models using Monte Carlo method. Among them is the large neutron-flux attenuation, which is observed in deep penetration problems. Various reduction techniques are used to increase the efficiency of Monte Carlo calculations in such tasks. It allows to reduce the statistical uncertainty of the functional evaluation without increasing the number of neutron histories. This work is devoted to study and testing of variance reduction techniques in the deep penetration problem. To demonstrate the possibility of using non-analogue Monte Carlo modeling a test problem was formulated. To quantify the efficacy of applying the variance reduction methods, FOM characteristic is considered, which is a function of the relative error in a flux estimate and the computational time of the simulation. The article considers non-analogue techniques implemented in the MCU (Monte Carlo Universal) and OpenMC codes. As part of the study, a module of the OpenMC code was developed that allows to automatically generate weight windows. It is shown that variance reduction techniques increase the calculation efficiency by several times, particularly, the weight windows method in OpenMC make it possible to achieve a 7-fold increase in the efficiency of neutron flux estimation with the same number of simulated histories. The formulated recommendations can be used in the calculation of innovative nuclear reactors full-scale models.

*Keywords:* Monte Carlo method, mathematical modeling, test problem, deep penetration problem, non-analogue modeling, variance reduction techniques, splitting/russian roulette, weight windows, FOM, external source.

*For citation:* Bogdanova E.V., Tikhomirov G.V. Test Results of Variance Reduction Techniques Applied to Deep Penetration Problem // Global Nuclear Safety. 2022. Vol. 4(45). P. 25-39. <http://dx.doi.org/10.26583/GNS-2022-04-03>

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

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING  
COMMISSIONING OF EQUIPMENT  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.316.925:621.315.1  
DOI 10.26583/gns-2022-04-04  
EDN EJATOG

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ  
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С МАЛЫМИ  
ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ**

© 2022 Шилин Александр Николаевич<sup>1</sup>, Дикарев Павел Владимирович<sup>2</sup>,  
Дементьев Сергей Сергеевич<sup>3</sup>

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия

<sup>1</sup>[eltech@vstu.ru](mailto:eltech@vstu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8726-3556>

<sup>2</sup>[dikarev.pavel@mail.ru](mailto:dikarev.pavel@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5726-6729>

<sup>3</sup>[c165tc34@yandex.ru](mailto:c165tc34@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8510-6001>

*Аннотация.* Атомные электростанции (АЭС) являются одним из основных источников электроэнергии. Распределение электроэнергии, вырабатываемой АЭС, или резервное электроснабжение отдельных потребителей собственных нужд электростанции может осуществляться по сети 6-35 кВ. Данные сети работают с изолированной или компенсированной нейтралью. Это обуславливает факт того, что токи однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) при авариях на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) достаточно малы и ОЗЗ трудно идентифицируемы. В статье рассматриваются вопросы выявления ОЗЗ и соответствующего селективного реагирования системы защиты ВЛ. Доказывается ограниченность функционирования релейной защиты от ОЗЗ, построенной на классическом принципе срабатывания «если-то». Погрешность традиционной системы защиты объясняется отсутствием механизма актуализации уставок в соответствии с изменением условий окружающей среды, влияющих на ёмкостную составляющую проводимости воздушных линий. В качестве примера подобного влияния описывается воздействие оледенения проводов, а также трибоэлектрического эффекта в виде накопления объёмного заряда в воздушном промежутке вокруг линии. В связи с этим описывается способ коррекции уставок защиты за счёт периодических измерений ёмкости линий путём их локационного зондирования. Таким образом, предлагается усовершенствовать традиционную токовую защиту от ОЗЗ путём придания системе способности к адаптации, но в рамках её реагирования как агента с простым поведением. Рассматривается построение и более совершенной системы защиты от ОЗЗ в виде интеллектуального агента электрической сети. Сущность данной системы заключается в использовании искусственной нейронной сети в качестве обрабатывающего информацию субагента. Доказывается преимущество нейрокомпьютерной системы защиты от ОЗЗ, формирующей интегральную оценку состояния линий электропередачи и обучающейся выявлению ОЗЗ на цифровой тени, следующей за электрической сетью. Указывается возможность классификации предлагаемой системы защиты от ОЗЗ как интеллектуального агента в силу наличия способностей к адаптации, обучению и развитию.

*Ключевые слова:* надёжность электроснабжения, резервирование собственных нужд АЭС, однофазные замыкания на землю, компьютерная релейная защита, импульсная рефлектометрия, оледенение линий электропередачи, трибоэлектрический эффект, интеллектуальные агенты, искусственные нейронные сети, цифровые тени.

*Для цитирования:* Шилин А.Н., Дикарев П.В., Дементьев С.С. Интеллектуальная система релейной защиты воздушных линий в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 40-53. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-04>

Поступила в редакцию 31.08.2022

После доработки 22.11.2022

Принята к печати 29.11.2022

На сегодняшний день электрические сети класса 6-35 кВ в России в подавляющем большинстве случаев работают в режиме с изолированной или компенсированной нейтралью. Подобное техническое решение относится и к электрическим сетям, подключаемым к атомным электростанциям (АЭС) для передачи вырабатываемой электроэнергии на среднем напряжении или резервирования электропитания отдельных потребителей собственных нужд АЭС. Особенностью указанных электрических сетей является низкий уровень токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), в связи с чем зачастую подобная неисправность не классифицируется как короткое замыкание, а регламент Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей в одних случаях требует немедленного отключения линии электропередачи, а в других – сигнализации и определения места ОЗЗ с последующей изоляцией повреждённого участка сети [1]. При этом следует отметить, что на долю однофазных замыканий на землю приходится около 70-80 % от общего числа аварий в сетях 6-35 кВ [2], что указывает на исключительную актуальность проблемы регистрации ОЗЗ и соответствующей защиты линий. Тем не менее ввиду указанного обстоятельства – малых токов ОЗЗ, не превышающих 20-30 А (даже при большом количестве отходящих линий) – создание аппарата селективной и высокочувствительной защиты практически невозможно, о чём прямо заявляется М.А. Шабаром [1]. На наш взгляд, последнее утверждение абсолютно справедливо в рамках применения классической парадигмы построения терминала защиты в виде, используя терминологию прикладной информатики, агента с простым поведением – которое заключается в измерении какой-либо заданной величины, сравнения текущего значения этой величины с жёстко заданной уставкой и реагирования через систему актуаторов.

В зависимости от реализуемой методики защиты от ОЗЗ подвергаться измерениям могут напряжения или токи нулевой последовательности, сумма высших гармонических составляющих тока при ОЗЗ, «наложенный» переменный ток пониженной частоты (25 Гц) и т.д. Тем не менее, повторяясь, можно сказать, что базовый принцип срабатывания (поведения) защит, построенных на перечисленных способах, одинаков. Ограниченность данного подхода объясняется следующим: агент (система релейной защиты) оперирует информацией, получаемой от единственного субагента, при этом исключительно в рамках модели «ЕСЛИ (условие) ТОГДА действие», что является априори недостаточно эффективным в условиях функционирования агента в реальной окружающей среде (отличающейся многообразием и изменчивостью) и действий в отношении реального объекта (характеризуемым множеством непрерывно изменяющихся параметров). Таким образом, приблизиться к идеалу селективной и высокочувствительной защиты от ОЗЗ можно, сформулировав в первую очередь постулаты об:

– адаптивности системы релейной защиты, её построения в виде интеллектуального (обучающегося) агента, способного обучаться и развиваться в процессе взаимодействия с окружающей средой, обладать базой примеров необходимых реакций с возможностью её пополнения. Выражаясь более конкретно, это означает наличие механизма адаптации параметров срабатывания защиты в соответствии с внешней средой – например, коррекции с заданной периодичностью тока уставки в соответствии с изменением ёмкости защищаемой линии, учётом неполноты замыкания на землю (при ОЗЗ через переходные сопротивления), а также принимая во внимание иные факторы влияния, известные из общей «картины мира», которой оперирует агент;

– интегральном критерии оценки состояния линии, на основании которого и принимается решение о немедленном отключении линии, несрабатывании или срабатывании «на сигнал» (сигнализации). Выяснение состояния линии будет тем точнее, чем большее количество факторов (в том числе и неформальных) учитывается при данном рассмотрении, что и позволит интеллектуальному агенту (аппарату релейной защиты) дать взвешенную многостороннюю оценку и предпринять действие, наиболее корректное на текущий момент времени.

Всё вышесказанное свидетельствует о том, что защита линий электропередачи от ОЗЗ относится к классу задач, решаемых искусственным интеллектом. Непосредственным образом его функции могут исполняться с помощью искусственной нейронной сети – технологии моделирования нервной системы живого организма для реализации процессов обработки информации. Следуя этому подходу, построение системы защиты от ОЗЗ в виде интеллектуального агента следует рассмотреть в два этапа, а именно: анализа «картины мира», т.е. основных факторов воздействия (проявления) внешней среды, которые должны быть известны агенту для их учёта и коррекции возникающих искажений, а также механизма функционирования нейросети в качестве процессора для обрабатывающего субагента.

Очевидно, что наибольшее практическое значение концептуальное конфигурирование адаптивной защиты от ОЗЗ с алгоритмом срабатывания по интегральному критерию имеет применительно к воздушным линиям электропередачи (ВЛ). Передача и распределение большей части электрической энергии в сети по-прежнему выполняется посредством воздушных линий – в нашей стране эксплуатируемых зачастую в сложных климатических условиях и имеющих значительное удлинение для охвата обширных территорий – и в связи с этим подверженных многочисленным авариям.

### **Погрешности токовой защиты**

В случае реализации токовой защиты от ОЗЗ посредством специального трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) уставка срабатывания  $I_C$  реле определяется по суммарному ёмкостному току сети за вычетом тока, характеризуемого ёмкостью повреждённой линии, т.е. при помощи выражения (1) [1]:

$$I_C = 3U_\phi \omega (C_\Sigma - C_n), \quad (1)$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение сети;

$\omega$  – циклическая частота (для сети 50 Гц 314 рад/с);

$C_\Sigma$  – суммарная ёмкость всех неповреждённых линий сети;

$C_n$  – ёмкость повреждённой (защищаемой) линии.

Анализируя данную формулу, можно прийти к выводу о том, что точность срабатывания токовой защиты от ОЗЗ непосредственным образом коррелируется с корректностью задания ёмкостей линий, составляющих электрическую сеть. В реальных условиях эксплуатации ВЛ её ёмкость не является константой и в целом зависит от множества факторов внешней среды. Перечислим основные из них.

1. Оледенение проводов. Формирование на линии гололёдных муфт сравнимо с возникновением ёмкостного делителя напряжения  $C_{ГМ} // C'$ , что наглядно показано на рисунке 1 ( $C_{ГМ}$  – ёмкость «ледяного конденсатора»,  $C'$  – ёмкость между оледенелой поверхностью фазы и землёй). Считая гололёдную муфту цилиндрической, полная погонная ёмкость  $C$  провода относительно земли определяется следующим выражением (2):

$$C = \frac{C_{ГМ}C'}{C_{ГМ}+C'} \quad (2)$$

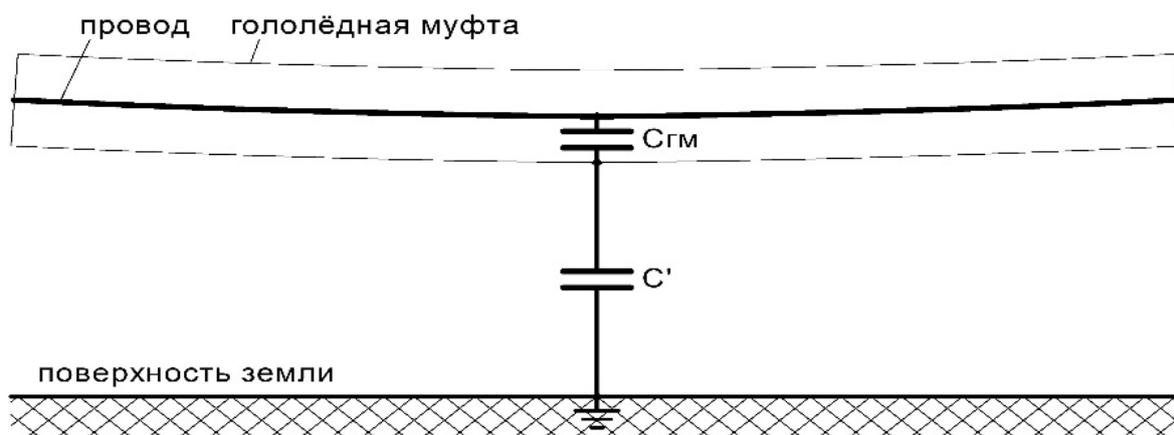


Рисунок 1 – Гололёдная муфта на проводе ВЛ и образование ёмкостного делителя  
[Ice clutch on the overhead line wire and the formation of a capacitive divider]

Следовательно, без учёта гололёдообразования возникнет погрешность в задании ёмкости линии при расчёте уставок по выражению (1), которая может быть найдена (полагая пренебрежимо малым уменьшение расстояние от оледенелой поверхности фазы до земли по сравнению с отсутствием ледяной оболочки) по формуле (3):

$$ERR_C = \frac{c'}{C_{ГМ}+c'} \quad (3)$$

2. Накопление объёмного заряда в воздушном промежутке, окружающем провода ВЛ при снежных метелях и песчаных бурях. Это явление объясняется трибоэлектрическим эффектом, который в окружающей среде может проявляться в процессе интенсивного трения частичек снега и кристаллов льда при сильных низовых потоках ветра, что приводит к возникновению у земной поверхности сильных электрических полей, а вблизи зарядившихся таким образом объектов – коронных и даже искровых электрических разрядов [3]. Воздушные линии электропередачи класса 6-10-20 кВ выполняются на относительно низких опорах, вследствие чего высота подвеса проводов не превышает 9-10 м и линию окружает среда, представляющая собой дисперсную систему «воздух-снежная пыль» [4]. Иными словами, три фазы линии могут полностью охватываться мощными взвихриваниями снежной пыли, при этом снежинки, сталкиваясь с проводами, передают им свой заряд, вследствие чего возникают разряды и соответствующие токи утечек. В одном из источников [3] отмечается, что накопившийся в воздухе объёмный заряд особенно при наличии свежеснежавшего снега может достигать  $10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>.

Проанализируем в количественном отношении влияние двух указанных факторов – оледенения и проявления трибоэлектрического эффекта при снежных метелях – на погрешность задания уставок токовой защиты от ОЗЗ при фиксированных значениях ёмкостей линий в сети. А в качестве способа снижения этой погрешности предложим непосредственное измерение ёмкости каждой линии, например, посредством её локационного зондирования импульсным рефлектометром.

Последнее требует учёта диэлектрической проницаемости льда  $\epsilon_l$  как функции частоты электрического поля, т.к. на частотах выше 1 МГц (на которых и производится зондирование) величина проницаемости в десятки раз меньше, чем в пределе, близком

к статическому, в частности на относительно низкой промышленной частоте 50 Гц (3,20 против  $\approx 91$  соответственно).

Моделирование изменения ёмкости ВЛ в условиях гололёдообразования и наэлектризованности воздушного промежутка вблизи линии можно произвести посредством компьютерного эксперимента, задавая геометрическую модель линии, её параметры и параметры внешней среды и вычисляя соответствующие ёмкости. Расчётную модель логично построить с допущением об отсутствии влияния на картину электрического поля траверсы и стойки опоры (выполняемой чаще всего из железобетона, а ранее дерева), а также исходя из глубины моделирования 1 км, цилиндрической формы гололёдных отложений, непровисания проводов и фиксированного значения температуры воздуха и льда около  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (273 К).

Результаты проведённого данным образом анализа функционирования линии 10 кВ, выполненной на ж/б опорах П10-1, характеризуют представленные на рисунке 2 графики изменения погрешности  $ERR_C$  при нарастании толщины гололёдной муфты от 0 до 30 мм в различных условиях наэлектризованности среды, т.е. при накоплении объёмного заряда воздуха  $\rho$  вплоть до  $5 \cdot 10^{-13}$  Кл/м<sup>3</sup> (что в 20000 раз меньше зарядов, регистрируемых на гористой местности или в полярных областях [3]).

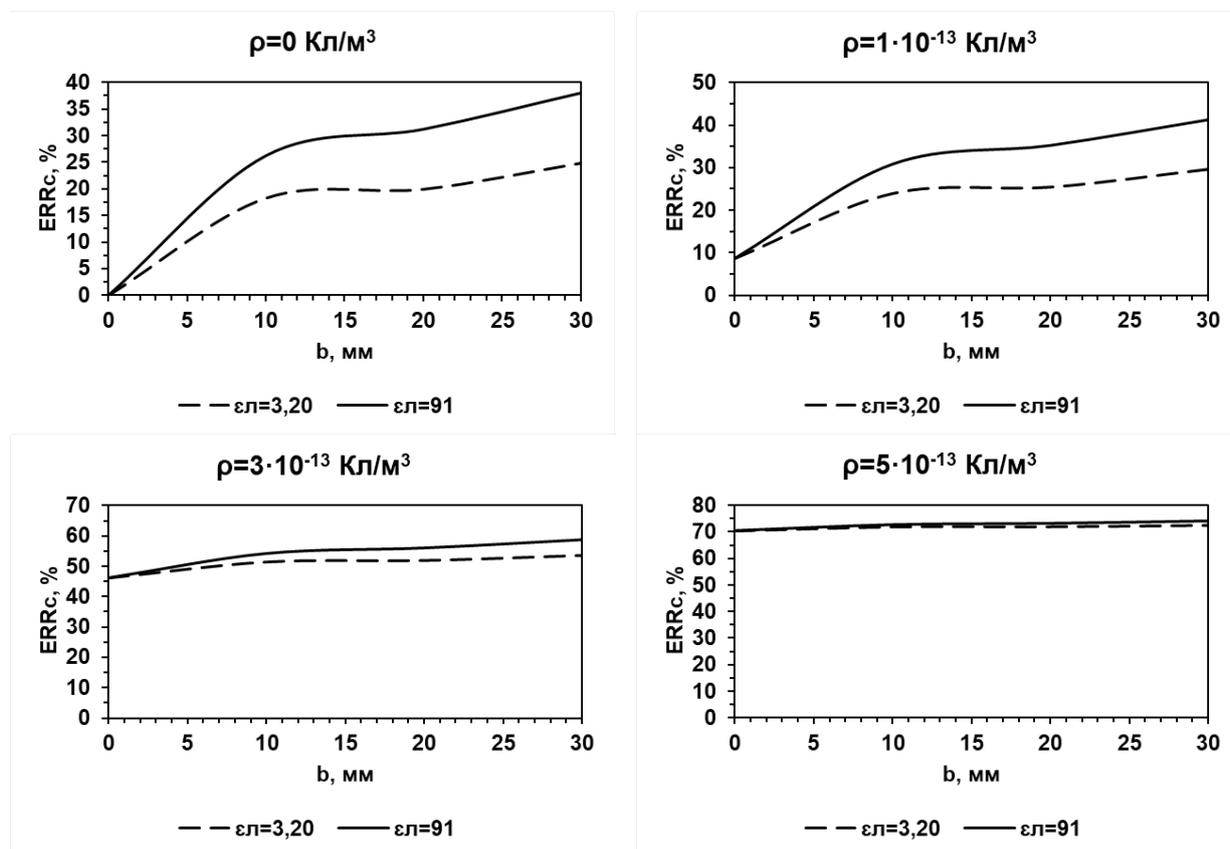


Рисунок 2 – Изменение погрешности задания ёмкости линии при гололёдообразовании и увеличении наэлектризованности воздушной среды вокруг проводов [Change in line capacity error during ice formation and an increase in the electrification of the air around the conductors]

Как видно из этой серии графиков, неучёт оледенения приводит к значительным отклонениям ёмкости линии относительно исходного значения вплоть до 38 % при отсутствии проявления трибоэлектрического эффекта в воздушном промежутке вокруг линии; накопление же объёмного заряда увеличивает эту погрешность практически в 2 раза (до 74 %). При этом, как следует из графика на рисунке 3, девиация погрешности  $ERR_C$ , вызванная несовпадением частоты импульсов (1 МГц), генерируемых

рефлектометром, и промышленной частотой передачи электроэнергии (50 Гц), практически нивелируется в ходе нарастания наэлектризованности среды вокруг линии.

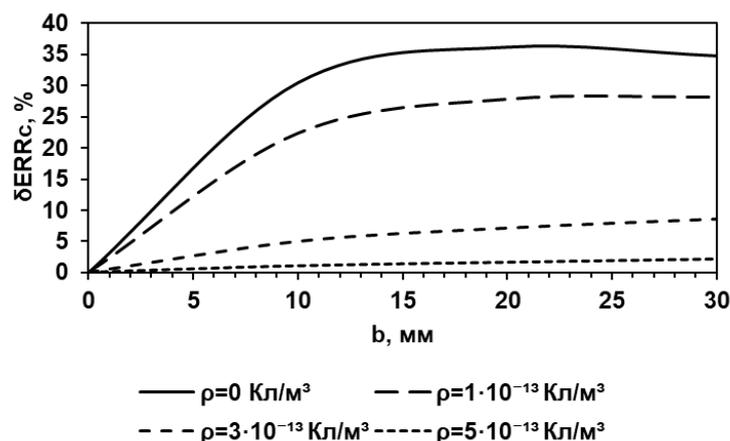


Рисунок 3 – Изменение разности между погрешностями задания ёмкости на частотах 50 Гц и 1 МГц при разном уровне наэлектризованности воздушной среды [Variation in the difference between the capacitance reference errors at 50 Hz and 1 MHz at different levels of air electrification]

В целом же величина  $\delta ERR_C$  уменьшается при охлаждении льда в силу того, что относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_L$  в околостатической области (в том числе на частотах не более 100 Гц) довольно сильно зависит от температуры  $T$  согласно эмпирической формуле (4) [3]:

$$\epsilon_L(T) = 1982,084329 - 22,098339T + 0,087238T^2 - 1,1596 \cdot 10^{-4}T^3 \quad (4)$$

и понижается с 91 до 58 в диапазоне температур льда 273-233 К (однако на частоте 1 МГц остаётся практически неизменной – 3,20 и 3,17 соответственно).

Из всего вышесказанного следует, что точность срабатывания токовой защиты линий от ОЗЗ можно уже существенно улучшить, вводя в алгоритм функционирования соответствующей системы механизм адаптивного изменения уставки тока за счёт измерения с заданной периодичностью ёмкости линий.

Суть данного измерения посредством локационного зондирования заключается в следующем. На частотах от 1 МГц и выше коэффициент укорочения электромагнитной волны (показатель уменьшения фазовой скорости импульса  $v_\phi$  относительно скорости света в вакууме  $c$ ) с высокой долей точности определяется исключительно ёмкостью  $C_0$  и индуктивностью  $L_0$  линии на 1 км, т.е.  $K_{\text{укор}} = c\sqrt{L_0 C_0}$ , т.к. удельные активные сопротивление  $R_0$  и проводимость  $G_0$  линии электропередачи пренебрежимо малы в сравнении с соответствующими реактивными параметрами ( $R_0 \ll \omega L_0, G_0 \ll \omega C_0$ ), при этом подробный анализ влияния  $R_0$  и  $G_0$  на величину фазовой скорости приведён в статье «Расчёт погрешностей рефлектометров для мониторинга линий электропередач» [5]. Следовательно,  $v_\phi = c/K_{\text{укор}} = 1/\sqrt{L_0 C_0}$  и в силу того, что рефлектометром измеряется время  $t$  двойного пробега зондирующего импульса по линии длиной  $l$ , т.е.  $l = t \cdot v_\phi / 2$ , можно выразить  $C_0$  при известной погонной индуктивности  $L_0$ , формула (5):

$$C_0 = \frac{t^2}{4l^2 L_0}. \quad (5)$$

Индуктивность воздушной линии не зависит от характеристик оледенения проводов или их провисания и коррелируется только с величиной удельной проводимости земли. Количественно эта зависимость описывается хорошо известными из трудов Д.Р. Карсона выражениями для индуктивного сопротивления линии провод-земля, формула (6) [6]:

$$X_L = 0,145 \lg \frac{D_3}{r_{\text{э.п.}}}, \quad (6)$$

где  $r_{\text{э.п.}}$  – эквивалентный радиус провода, учитывающий наличие внутреннего магнитного поля провода (для стандартных проводов марки АС около 0,9 от действительного радиуса провода);

$D_3$  – эквивалентная глубина расположения обратного провода в земле, определяемая частотой тока (сигнала)  $f$  и удельной проводимостью земли  $\lambda$ , выражение (7) [6]:

$$D_3 = \frac{66,4}{\sqrt{f \cdot \lambda}}. \quad (7)$$

Таким образом, при расшифровке рефлектограммы для оценки текущего значения ёмкости линии по формуле (1) задать корректную величину индуктивности не составит труда, предварительно измерив удельную проводимость земли.

Естественно, подобный подход имеет множество ограничений, упрощений реальной «картины мира». Во-первых, следует упомянуть о том, что само оперирование понятием об удельных параметрах линии, т.е. предположением о прямой пропорциональности между длиной линии и её какой-либо характеристикой (сопротивлением, проводимостью), является допущением, т.к. реальная воздушная линия не может быть однородной, хотя бы в силу рельефа местности (о чём применительно к ёмкости линии говорится в работе «Моделирование сопротивления воздушных линий электропередачи» [7]), неравномерности формирования гололёдных отложений вдоль трассы линии, разности грунтов и степени их увлажнённости, возникновения на отдельных участках линии метелей с разными условиями проявления трибоэффекта, разности температур окружающей среды и т.д. В связи с этим отчасти неоднородность линии можно учесть, размещая на проводах ВЛ с заданной периодичностью искусственные неоднородности волнового сопротивления, что позволит анализировать прохождение соответствующих отражённых импульсов и формирования массива данных о  $C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0n}$  на  $n$  условно однородных участках линии.

Этот анализ возможно осуществлять с ещё большей точностью, имея аналогичные массивы температур  $T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0n}$  и проводимости грунтов  $\lambda_{01}, \lambda_{02}, \dots, \lambda_{0n}$  на заданных участках трассы линии, размещая на них датчики температуры  $T$  и проводимости  $\lambda$  и осуществляя их опрос по беспроводным каналам связи. Тем не менее это усложняет конструкцию системы релейной защиты и на практике в ряде случаев может являться избыточным, в силу чего достаточно ограничиться хотя бы одним комплектом датчиков  $T$  и  $\lambda$  на передающем конце линии (особенно при её небольшом удлинении и относительно малым разбросом геовоздействия).

Исходя из всего вышесказанного следует, что классической токовой защите от ОЗЗ, не изменяя принцип её простого поведения, можно привить определённую адаптивность посредством поочерёдных, выполняемых в том числе в автоматическом режиме измерений ёмкостей отходящих воздушных линий. Данное измерение можно осуществлять путём импульсного зондирования линий с одновременной регистрацией температуры окружающей среды и электрической проводимости грунта (опрашивая соответствующие датчики). Импульсное зондирование линий, находящихся под

напряжением, выполняется рефлектометром, подключаемым через конденсатор связи при наличии ВЧ-заградителей. Также возможно использование генераторов импульсов в совокупности с цифровым осциллографом, имеющим полосу пропускания не менее 200 МГц. О применении генератора импульсов и осциллографа для рефлектометрического анализа линий и измерения их ёмкостей и индуктивностей говорится в статье «Рефлектометрия и импульсные рефлектометры» [8].

### **Нейрокомпьютерная релейная защита**

Как упоминалось ранее, более существенное улучшение характеристик функционирования защиты (чувствительность и селективность) можно добиться, вводя в структуру системы в качестве обрабатывающего субагента искусственную нейронную сеть. На сегодняшний день существует довольно много публикаций, касающихся в целом применения отдельных инструментов искусственного интеллекта в том числе нейросетей в составе различных систем и устройств для обработки информации о функционировании электрической сети (особенно в привязке к вопросу модернизации существующих сетей согласно технологии Smart Grid). Об этом упоминается и в фундаментальной монографии А.Г. Фадке и Д.С. Торпа [9].

Попытаемся конкретно охарактеризовать параметры искусственной нейронной сети для фиксации ОЗЗ и соответствующего управляющего воздействия. Повторяясь, отметим, что будем исходить из логического постулата о том, что взвешенная интегральная оценка состояния объекта по нескольким критериям позволяет сформировать более корректное воздействие на этот объект, нежели в результате анализа его какой-либо одной характеристики. Саму же нейронную сеть будем рассматривать в виде чёрного ящика неизвестной структуры, но удобного инструмента для того, чтобы реализовать срабатывание защиты по упомянутому интегральному критерию, а также наделить систему защиты свойствами интеллектуального агента – способностями к обучению и анализу себя в терминах поведения (ошибки и успеха) для дальнейшего развития. Эти возможности, предоставляемые нейросетью, характеризуют её как аппарат обработки информации вне зависимости от многочисленных вариантов построения и свойственны как простейшей перцептронной сети, так и сетям более сложных конфигураций, описываемых в [10].

Итак, для интегрального оценивания состояния воздушной линии, отходящей от конкретной фидерной ячейки на понижающей подстанции или распределительном устройстве электростанции, на вход нейронной сети можно предоставить следующую информацию:

- 1) осциллографируемые токи нулевой последовательности на каждом фидере в виде их отношений к эталонным токовым уставкам, вычисленным до аварии в сети;
- 2) результаты гармонического (посредством быстрого преобразования Фурье) или вейвлет-анализа регистрируемых токов нулевой последовательности (как косвенный показатель ОЗЗ на той или иной линии);
- 3) разность рефлектограмм каждой отходящей линии как результат вычитания из рефлектограммы исходного состояния линии (до аварии) рефлектограммы, снятой в текущем режиме работы линии (подробнее о разностном методе выявления ОЗЗ см. в источнике [11]).

При этом пуск опроса нейронной сети на предмет интегральной оценки каждой отходящей линии и выдачи в отношении неё управляющего кода (отключить, оставить в работе, сигнализировать о неустойчивом ОЗЗ) осуществляется при регистрации измерительным трансформатором напряжения нулевой последовательности. В связи с этим возникает вопрос о предварительном обучении нейросети, т.к. корректное управляющее воздействие нейросеть может обеспечить лишь при условии её натренированности в распознавании ОЗЗ на основе обучающих примеров – каждый из которых представляет собой пару из указанного массива данных по пп. 1-3 и требуемой

реакции на предъявление этих данных [12, 13]. Процесс подобной тренировки сети является её «обучением с учителем» (заглянув в чёрный ящик, отметим, что это есть ничто иное как подбор весов синаптических связей нейронов), а для его выполнения необходим соответствующий «учебник».

Обеспечить наполнение «учебника» нейросети обучающими примерами возможно посредством использования упрощённого цифрового двойника электрической сети – её цифровой тени. В целом создание цифровых двойников, как отмечается в источнике [14], относится к числу наиболее важных трендов в развитии современных цифровых технологий, а в энергетике рассматривается как перспективный инструмент управления функционированием и развитием тех или иных энергообъектов. В контексте нашей задачи – формирования «учебника» для обучения нейросети распознаванию ОЗЗ на каждом конкретном фидере – достаточно цифровой тени электрической сети, т.е. компьютерной модели, параметры которой обновляются вслед за реальной сетью, и необходимой для предсказания поведения сети исключительно при ОЗЗ в виде выходной реакции по пп. 1-3. Иными словами, на модели сети, следующей с заданной дискретностью по времени за реальной сетью, отрабатываются ОЗЗ на каждой линии на различном удалении от фидерных ячеек, т.е. снимаются реакции (регистрируются виртуальным осциллографом), фиксируемые на фидерах повреждённых и неповреждённых линий в характеристиках по пп. 1-3, и собираются для каждой линии в соответствующие пары «реакция сети-необходимая реакция защиты».

Вместе с тем закономерным выглядят следующий ряд вопросов.

1. Каким образом регулируется количество обучающих примеров для тренировки нейросети распознаванию ОЗЗ на линиях – для каждой линии электрической сети в равном количестве или пропорционально каким-либо критериям? Очевидно, что частота тренировок нейросети выявлению ОЗЗ должна коррелироваться с надёжностью электропередачи по той или иной линии. Также очевидно, что для линии, отличающейся повышенной склонностью к авариям, количество обучающих примеров, предъявляемых нейросети, должно быть больше. При этом повреждаемость линии можно оценить по двум критериям:

а) текущие гололёдно-ветровые нагрузки, зафиксированные на трассе линии, в процентном соотношении от максимально допустимых исходя из проектной документации значений (гололёдные нагрузки могут быть измерены при импульсном зондировании по затуханию сигнала или за счёт применения специальных датчиков, ветровые нагрузки регистрируются анеморумбометрами);

б) скорость возрастания информационной энтропии  $dH/dt$  (как мера устаревания линии и снижения её эксплуатационной надёжности). Так, вероятность отказа линии по каждой  $i$ -й причине (например, оледенения или грозových перенапряжений) находится как  $q_i = n_i/N$ , где  $n_i$  – зафиксированное количество отказов по  $i$ -й причине,  $N$  – суммарное число неисправностей по всем  $m$  причинам ( $N = \sum_{i=1}^m n_i$ ). Тогда по формуле, предложенной К. Шенноном [15], информационная энтропия для каждого  $i$ -го события  $H_i = -q_i \log_2 q_i$ , а итоговая энтропия за  $k$ -й рассматриваемый год как сумма энтропий  $i$ -х событий составит  $H_k = \sum_{i=1}^m H_i$ . Следовательно, рассматривая информационную энтропию как функцию времени  $H(t)$ , скорость её возрастания с учётом многолетней статистики эксплуатации линий (ансамбля статистических данных) может являться признаком как ухудшения состояния линии (стремительного износа) при относительно высоком  $dH/dt$ , так и улучшения (например, после реконструкции) при относительно низком  $dH/dt$ .

Тогда, опираясь на эти два пункта, возможно на начальном этапе построения системы защиты сформировать экспертную оценку варьирования количества обучающих примеров для той или иной линии, а затем заложить данный механизм в компьютерную программу. В целом же не поддаётся сомнению тот факт, что для

изношенной линии, на которой в данный момент времени зафиксировано повышенное гололёдообразование, вероятность ОЗЗ больше, в силу чего доля примеров, обучающих нейросеть распознаванию ОЗЗ именно на этой линии, также должна быть увеличена и наоборот. Количественная же характеристика этого факта, повторимся, есть предмет предварительного экспертного обсуждения для выработки соответствующей формальной зависимости.

2. По каким параметрам цифровая тень должна подражать реальной сети? В силу того, что ток ОЗЗ имеет ёмкостной характер, необходимо обеспечить следование компьютерной модели изменениям ёмкостной составляющей проводимости воздушных линий в сети. В случае упрощённой модели, представляющей каждую линию как однородную, в соответствии с её текущим состоянием корректируется величина погонной ёмкости. При использовании более сложной и точной модели, рассматривающей реальную неоднородную линию в виде отдельных условно однородных секций, обновляются значения ёмкостей на этих выделенных участках. При работе в составе цифровой тени виртуального рефлектометра требуется следование и за величиной индуктивности линий для снятия показаний по п. 3. Не требует пояснений и тот факт, что цифровая тень электрической сети должна подражать изменению её топологии, например, при погашении подключений отдельных линий или их участков, коммутируемых реклоузерами.

3. Каким образом за реальной сетью следует её цифровая тень? Одним из методов переноса характеристик воздушной линии в компьютерную модель может являться проводимое с заданной периодичностью локационное зондирование с последующим косвенным измерением ёмкости. Суть и порядок выполнения данной процедуры подробно описаны выше.

Резюмируя, можно сформулировать алгоритм адаптации параметров искусственной нейронной сети к текущим условиям функционирования линий за счёт тренировки обнаружению однофазных замыканий на цифровой тени, следующей за реальной электрической сетью (рис. 4).



Рисунок 4 – Механизм коррекции искусственной нейронной сети в соответствии с текущими условиями  
[Mechanism to correct the artificial neural network according to current conditions]

Также может возникнуть вопрос, непосредственно касающийся того, в каком виде реализуются искусственная нейронная сеть и система защиты, построенная на её основе. Нейронная сеть любой конфигурации, может быть, без труда эмулирована

программным способом, при этом все процедуры по воплощению нейросети, сбору данных для приближения цифровой тени к электрической сети, подготовке обучающих примеров и переобучению нейросети реализуются в виде единого программного комплекса, исполняемого на компьютере [16]. Компьютер же, с одной стороны, осуществляет управление актуаторами для коммутации электрических приводов силовых выключателей, а с другой стороны, имеет доступ для съёма информации с физических устройств контроля состояния линий – трансформаторов тока нулевой последовательности и измерительных трансформаторов напряжения (через осциллографические приставки с АЦП и резистивным преобразованием сигналов тока в напряжение), цифрового рефлектометра, датчиков проводимости грунта, температуры окружающей среды и т.д. Таким образом, на аппаратном уровне описываемая структура системы защиты от ОЗЗ (рис. 5) принципиально соответствует классическому представлению об устройстве компьютерной релейной защиты, изложенному в монографии А.Г. Фадке и Д.С. Торпа [9]. Коренное отличие заключается в самом спектре обрабатываемых потоков информации и способе её обработки, базирующемся на обучении и опросе искусственной нейронной сети – обучении на откликах цифровой тени и опросе на основании параметров реального отклика на ОЗЗ.

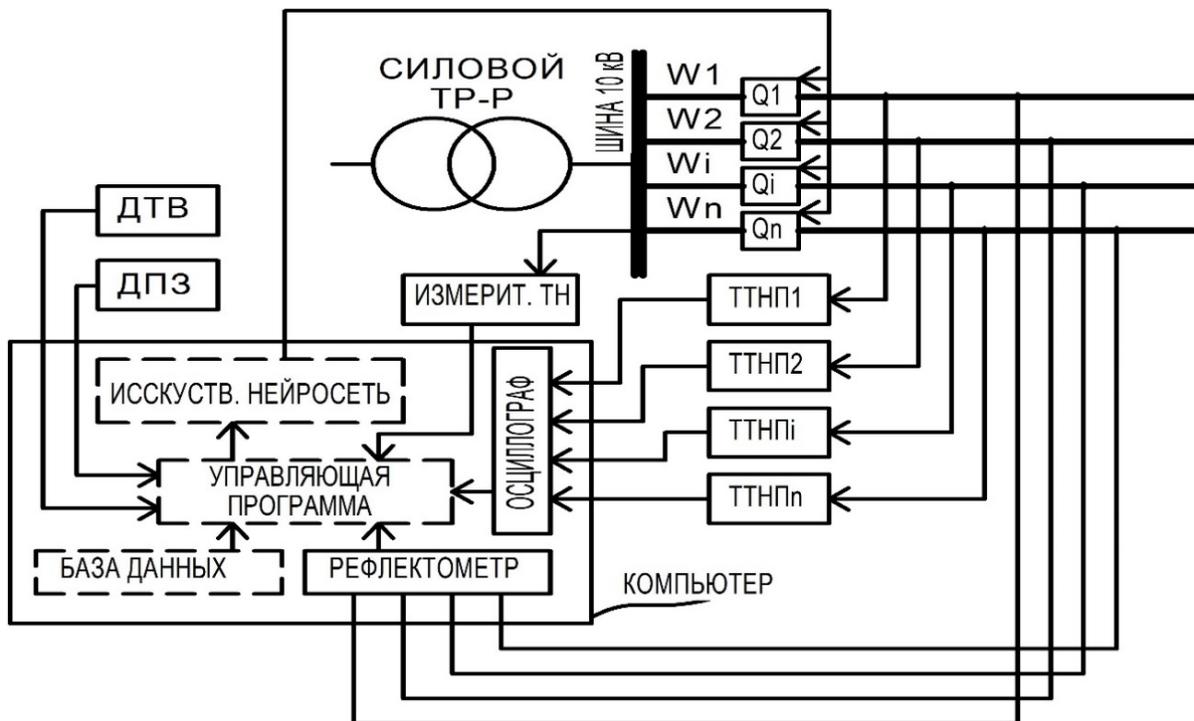


Рисунок 5 – Структурная схема нейрокомпьютерной системы защиты от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ:  $W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n$  – воздушные линии электропередачи;  $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n$  – силовые выключатели; ТТНП – трансформаторы тока нулевой последовательности соответствующих фидеров; ДТВ – датчик температуры воздуха; ДПЗ – датчик проводимости земли [Block diagram of a neurocomputer-based short-circuit protection system in 6-35 kV networks:  $W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n$  - overhead lines;  $Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n$  - circuit breakers; CTNP - zero sequence current transformers of corresponding feeders; DTV - air temperature sensor; DPZ - ground conductivity sensor]

### Заключение

Рассматривая предлагаемую систему защиты от ОЗЗ в категориях информатики, её можно охарактеризовать как интеллектуального агента в силу соответствия таким параметрам как адаптивность, обучаемость, способность к саморазвитию. Посредством следующей за реальной электрической сетью её цифровой тени достигается обновление обучаемых примеров для нейронного процессора как обрабатывающего субагента.

Происходит планомерное переобучение нейросети с заданной периодичностью, что позволяет говорить об адаптивности системы защиты в процессе взаимодействия с окружающей средой. При этом реализуемая на программном уровне нейросеть может с лёгкостью изменять свою структуру (в простейшем случае персептронной сети варьируя количество внутренних слоёв нейронов) или параметры обучения в результате анализа собственного поведения (например, исходя из точности и корректности выдаваемой управляющей реакции) – это позволяет говорить о наличии у системы обратной связи, т.е. возможности саморазвития. В конечном счёте переход от токовой защиты с простым поведением к интеллектуальной защите даёт возможность приблизиться к идеалу высокочувствительной и селективной защиты от ОЗЗ для существенного повышения качества и безопасности электроснабжения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке ВолгГТУ в рамках научного проекта № 38/468-22.*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Шабад, М.А.* Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ / М.А. Шабад. – Москва : НТФ «Энергопрогресс», 2007. – 64 с.
2. *Борковский, С.О.* Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю / С.О. Борковский, Т.С. Горева, Т.И. Горева // *Фундаментальные исследования.* – 2014. – № 9, ч. 5. – С. 954-959.
3. Диэлектрические свойства воды и льда [электронный ресурс] // Способы очистки и свойства воды. – URL : [https://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric\\_properties\\_of\\_water\\_and\\_ice](https://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric_properties_of_water_and_ice) (дата обращения: 11.11.2022).
4. Ridley C. Improving supply security on 11-kV overhead network. The development of interconnected operation, IEE Colloquium on Improving Supply Security on 11kV Overhead Networks, 1988, pp. 10/1-10/4.
5. *Шилин, А.Н.* Расчёт погрешностей рефлектометров для мониторинга линий электропередачи / А.Н. Шилин, А.А. Шилин, Н.С. Артюшенко // *Контроль. Диагностика.* – 2015. – № 9. – С. 52-59.
6. *Ахмедова, О.О.* Адаптивная информационно-управляющая система релейной защиты, реагирующая на изменение климатических факторов / О.О. Ахмедова, А.Г. Сошинов, П.В. Дикарев // *Вопросы электротехнологии.* – 2022. – № 2. – С. 78-88.
7. *Шилин, А.Н.* Моделирование сопротивления воздушных линий электропередачи / А.Н. Шилин, С.С. Дементьев // *Электротехнические комплексы и системы.* – 2018. – № 3, т. 14. – С. 5-11.
8. *Дьяконов, В.* Рефлектометрия и импульсные рефлектометры / В. Дьяконов // *Компоненты и технологии.* – 2012. – № 1. – С. 164-172.
9. *Фадке, А.Г.* Компьютерная релейная защита в энергосистемах : пер. с англ. / А.Г. Фадке, Д.С. Торп. – Москва : Техносфера, 2019. – 370 с.
10. *Аггарвал, Ч.* Нейронные сети и глубокое обучение : пер. с англ. / Ч. Аггарвал. – Москва : Вильямс, 2020. – 752 с.
11. *Минуллин, Р.Г.* Обнаружение локационным методом однофазных замыканий проводов линий электропередачи на землю / Р.Г. Минуллин, Ю.Я. Петрушенко, И.Ш. Фардиев, Э.И. Лукин, Г.В. Лукина // *Электричество.* – 2008. – № 12. – С. 20-28.
12. *Z. Liang, Z. Jian and L. Hua,* Research on Intelligent Transient Information Monitoring Technology for Overhead Line, 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 4102-4105, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881668.
13. *A. Nag and A. Yadav,* Fault classification using Artificial Neural Network in combined underground cable and overhead line, 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853664.
14. *Грабчак, Е.* Цифровые двойники и цифровые тени в электроэнергетике [электронный ресурс] / Е. Грабчак, Е. Медведева // *Цифровая подстанция.* – URL : <http://digitalsubstation.com/blog/2020/01/25/tsifrovyye-dvojniki-i-tsifrovyye-teni-v-elektroenergetike/> (дата обращения: 11.11.2022).
15. *Дулесов, А.С.* Мера неопределённости информации и её свойства применительно к оценке случайного поведения технического объекта / А.С. Дулесов, Н.Н. Кондрат // *Научное обозрение.* – 2014. – № 7. – С. 258-264

16. M. O'Donovan, E. Cowhey and N. Barry, Application oriented testing of power transmission lines and fault clearing, 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114000.

## REFERENCES

- [1] Shabad M.A. Zashchita ot odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh 6-35 kV [Protection against Single-Phase Earth Faults in 6-35 kV Networks]. Moscow: NTF «Energoprogress», 2007, 64 p. (in Russian).
- [2] Borkovsky S.O., Goreva T.S., Goreva T.I. Problema diagnostiki odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v setyakh s malymi tokami zamykaniya na zemlyu [The Problem of Diagnosing Single-Phase Earth Faults in Networks with Low Earth-Fault Currents], Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental Research], 2014, No. 9, part 5, pp. 954-959 (in Russian).
- [3] Dielektricheskiye svoystva vody i l'da [Dielectric Properties of Water and Ice]. Sposoby ochistki i svoystva vody [Water Treatment Methods and Properties], [https://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric\\_properties\\_of\\_water\\_and\\_ice](https://www.o8ode.ru/article/krie/Dielectric_properties_of_water_and_ice) (accessed 11.11.2022) (in Russian).
- [4] Ridley C. Improving Supply Security on 11-kV Overhead Network. The Development of Interconnected Operation, IEE Colloquium on Improving Supply Security on 11kV Overhead Networks, 1988, pp. 10/1-10/4 (in English).
- [5] Shilin A.N., Shilin A.A., Artyushenko N.S. Raschot pogreshnostey reflektometrov dlya monitoringa liniy elektroperedachi [Calculation of Errors of Reflectometers for Monitoring Power Lines], Kontrol'. Diagnostika [Control. Diagnostics], 2015, No. 9, pp. 52-59 (in Russian).
- [6] Akhmedova O.O., Soshinov A.G., Dikarev P.V. Adaptivnaya informatsionno-upravlyayushchaya sistema releynoy zashchity, reagiruyushchaya na izmeneniye klimaticheskikh faktorov [Adaptive Information and Control System for Relay Protection Responding to Changing Climatic Factors], Voprosy elektrotekhnologii [Issues of Electrical Technology], 2022, No. 2, pp. 78-88 (in Russian).
- [7] Shilin A.N., Dement'ev S.S. Modelirovaniye soprotivleniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi [Overhead Transmission Line Resistance Modelling], Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy [Electrotechnical Complexes and Systems], 2018, no. 3, v. 14, pp. 5-11 (in Russian).
- [8] Dyakonov V. Reflektometriya i impul'snyye reflektometry [Reflectometry and Pulse Reflectometers], Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies], 2012, no. 1, pp. 164-172 (in Russian).
- [9] Fadke A.G., Thorp D.S. Komp'yuternaya reley'naya zashchita v energosistemakh [Computer Relay Protection in Power Systems]. Moscow: Tekhnosfera, 2019, 370 p. (in Russian)
- [10] Aggarwal Ch. Neyronnyye seti i glubokoye obucheniye [Neural Networks and Deep Learning]. Moscow: Williams, 2020, 752 p. (in Russian)
- [11] Minullin R.G., Petrushenko Yu.Ya., Fardiev I.Sh., Lukin E.I., Lukin G.V. Obnaruzheniye lokatsionnym metodom odnofaznykh zamykaniy provodov liniy elektroperedachi na zemlyu [Detection by the Location Method of Single-Phase Short Circuits of Wires of Power Lines to Earth]. Elektrichestvo [Electricity], 2008, no. 12, pp. 20-28 (in Russian).
- [12] Z. Liang, Z. Jian and L. Hua, Research on Intelligent Transient Information Monitoring Technology for Overhead Line, 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 4102-4105, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881668 (in English).
- [13] A. Nag and A. Yadav, Fault Classification Using Artificial Neural Network in Combined Underground Cable and Overhead Line, 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853664 (in English).
- [14] Grabchak E. Tsifrovyye dvoyniki i tsifrovyye teni v elektroenergetike [Digital Twins and Digital Shadows in the Electric Power Industry], Tsifrovaya podstantsiya [Digital Substation], <http://digitalsubstation.com/blog/2020/01/25/tsifrovye-dvoyniki-i-tsifrovye-teni-v-elektroenergetike> (accessed 11.11.2022) (in Russian).
- [15] Dulesov A.S., Kondrat N.N. Mera neopredelonnosti informatsii i yeyo svoystva primenitel'no k otsenke sluchaynogo povedeniya tekhnicheskogo ob'yekta [Measure of Information Uncertainty and its Properties in Relation to the Assessment of the Random Behavior of a Technical Object], Nauchnoye obozreniye [Scientific Review], 2014, no. 7, pp. 258-264 (in Russian).
- [16] M. O'Donovan, E. Cowhey and N. Barry, Application Oriented Testing of Power Transmission Lines and Fault Clearing, 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114000 (in English).

## Intelligent Relay Protection System for Overhead Lines in Electrical Networks with Low Earth Fault Currents

Aleksandr N. Shilin<sup>1</sup>, Pavel V. Dikarev<sup>2</sup>, Sergey S. Dementyev<sup>3</sup>

<sup>3</sup>FSBEI HE «Volgograd State Technical University», Lenin avenue, 28, Volgograd, Russia, 400005

<sup>1</sup>eltech@vstu.ru, ORCID iD: 0000-0001-8726-3556, WoS ResearcherID: O-4627-2016

<sup>2</sup>dikarev.pavel@mail.ru, ORCID iD: 0000-0002-5726-6729, WoS ResearcherID: Q-9946-2016

<sup>3</sup>c165tc34@yandex.ru, ORCID iD: 0000-0002-8510-6001, WoS ResearcherID: O-6566-2017/

*Received by the editorial office on 08/31/2022*

*After revision on 11/22/2022*

*Accepted for publication 11/29/2022*

*Abstract.* Nuclear power plants (NPP) are one of the main sources of electricity. The distribution of electricity generated by nuclear power plants, or backup power supply to individual consumers of the power plant's own needs, can be carried out via a 6-35 kV network. These networks operate with an isolated or compensated neutral. This causes the fact that the currents of single-phase ground faults (SPGF) in case of accidents on overhead power lines (OL) are quite small and SPGF are difficult to identify. The article deals with the issues of identifying the SPGF and the corresponding selective response of the overhead line protection system. The limitation of the functioning of relay protection against SPGF, built on the classical principle of operation "if-then", is proved. The error of the traditional protection system is explained by the lack of a mechanism for updating the setpoints in accordance with changes in environmental conditions that affect the capacitive component of the conductivity of overhead lines. As an example of similar an influence, the effect of icing of wires, as well as the triboelectric effect in the form of accumulation of a space charge in the air gap around the line, is described. In this regard, a method is described for correcting the protection setpoints due to periodic measurements of the capacitance of the lines by means of their location probing. Thus, it is proposed to improve the traditional current protection against SPGF by giving the system the ability to adapt, but within the framework of its response as an agent with a simple behavior. The construction of a more advanced system of protection against SPGF in the form of an intelligent agent of the electrical network is also considered. The essence of this system is to use an artificial neural network as a subagent processing information. The advantage of a neurocomputer system for protection against SPGF is proved, which forms an integral assessment of the state of power transmission lines and learns to detect SPGF on a digital shadow following the electrical network. It indicates the possibility of classifying the proposed system of protection against SPGF as an intelligent agent due to the ability to adapt, learn and develop.

*Keywords:* power supply reliability, redundancy of nuclear power plant auxiliary needs, single-phase ground faults, computer relay protection, impulse reflectometry, power line icing, triboelectric effect, intelligent agents, artificial neural networks, digital shadows.

*For citation:* Shilin A.N., Dikarev P.V., Dementyev S.S. Intelligent Relay Protection System for Overhead Lines in Electrical Networks with Low Earth Fault Currents // Global Nuclear Safety. 2022. Vol. 4(45). P. 40-53. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-04>.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.516.22 : 621.039.524.44  
DOI 10.26583/gns-2022-04-05  
EDN FTNHGS

**ВЛИЯНИЕ ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ (Gd) НА  
КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ ( $k_{\infty}$ ) В ПРОЦЕССЕ  
ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА ДЛЯ ПОЛНОМАСШТАБНЫХ И  
ПОЛИЯЧЕЕЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕАКТОРА ВВЭР**

© 2022 Рахман Анисур С.К.<sup>1</sup>, Увакин Максим Александрович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Управление по Регулированию Атомной Энергии Бангладеш (БАЭРА), Агаргаон, Дакка-1207, Бангладеш

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>1</sup>ranisur01@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7803-8234>

<sup>2</sup>uvakin\_ma@grpess.podolsk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4917-1770>

*Аннотация.* В статье рассмотрены различные концентрации выгорающего поглотителя (ПВ) гадолия (Gd) в системе компенсации избыточной реактивности реактора типа ВВЭР при длительных кампаниях. Здесь проанализировано влияние метода на полномасштабную и полиячеечную модели размещения выгорающего поглотителя в топливе с гадолиниевыми стержнями (ТВЭГ). Показано сильное влияние состава выгорающего поглотителя (ПВ) в топливе с гадолиниевыми стержнями (ТВЭГ) на зависимость коэффициента выгорания топлива.

*Ключевые слова:* выгорающий поглотитель, компенсация, реактивность, полномасштабная модель, полиячеечная модель, коэффициент размножения, выгорание.

*Для цитирования:* Рахман Анисур С.К., Увакин М.А. Влияние выгорающего поглотителя (Gd) на коэффициент размножения ( $k_{\infty}$ ) в процессе выгорания топлива для полномасштабных и полиячеечных моделей для реактора ВВЭР // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 54-60. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-05>

Поступила в редакцию 15.07.2022

После доработки 30.09.2022

Принята к печати 12.10.2022

## Introduction

The general methods available for reactivity control, the insertion and withdrawal of neutron absorbers, generally referred to as control rods, is the approach usually taken for power reactors. A burnable poison, (a nuclide that has a large neutron absorption cross section) or a chemical shim (a neutron-absorbing chemical, usually boric acid, which is dissolved in the moderator or coolant) is employed for reactivity control depending on reactor types. There are three methods to control the reactivity of a power plant. The first method (by the insertion and withdrawal control rod) has a negative effect on the axial power distribution, and the insertion or withdrawal control rod will change the power of reactor. The second method is chemical shim (a neutron-absorbing chemical, usually boric acid, which is

concentrated in the moderator or coolant), this method has a better effect on the radial and axial power distribution, but in depending on burnup, the concentration of boric acid in the moderator should be decrease by operator or automation system to conserve the criticality state and any mistake will happen in this system will cause accident in the core. The third method is burnable absorber [1-2] (a nuclide that has a large neutron absorption cross section), and there are many nuclides using in the fuel as an absorber like Gd, Pu, Cm, Np, Am and Th etc. All these elements change the reactivity of the power reactor.

### **Objective**

In operating WWER-1200 reactors, which use extended campaigns up to one and a half to two years, the number of fuels with gadolinium rod 18–24 pieces, and the weight content of  $Gd_2O_3$  is 5–8 wt.%. Due to this arrangement, the burnable absorber is permanent and completely disappears at the end of the campaign. In here evaluated the concentration of Gadolinium in the fuel with gadolinium rod (tveg) for the full-scale loading and poly cells model.

### **Description of the program GETERA-93**

The GETERA-93 program is designed for neutron-physical calculation of cells and poly-cells of nuclear reactors, both fast and thermal, in spherical, cylindrical and planar geometry. The program can be used to solve a wide range of problems: preparation of small-molecule cross sections for subsequent large-scale calculations, investigation of various characteristics of reactors in cell and poly-cellular models, solving problems related to burnout of fuels, modeling of various reactor regimes. The neutron-physical distribution of neutrons is calculated in the probability method of the first collisions [3-4].

The GETERA-93 program can be used to solve a wide range of tasks, both research and applied. With its help, it is possible to study the neutron-physical characteristics of the reactors at the cell and poly cells level. The algorithm for the multiplicity of the cell makes it possible to simulate sufficiently large fragments of the reactor on a small number of cells. In addition to calculations of the fragments of the reactor, the built-in algorithms allow modeling the burnup processes in the reactor and calculating the characteristics of fuel cycles: for example, the coarse fuel burnup in reactors with cyclic and in reactors with continuous fuel overload. Another large area of application of this program is the preparation of libraries of small sections so that they can later be used in full-scale models. The program allows you to take into account the environment of the cell when preparing sections, which is important when preparing the correct constants for small programs [5-6]. The program prepares both macromicro-sequences and constants for dynamic software complexes.

### **Full-scale and Poly-cells model**

Fuel assembly (FA) contains four types of rod

1. Fuel rod (tvel)
2. Fuel with gadolinium rod (tveg)
3. Central rod
4. Guide channel

Fuel rod and fuel with gadolinium rod (Figure-1) are divided into five zones. The first zone, which is contains «He» gas. The second zone, which is contains fuel ( $U^{235}$ ) (for the tvel) and fuel with gadolinium (for the tveg) [7-8]. The third zone which is contains clearance zone. Forth zone contains shell zone and the fifth zone is coolant zone.

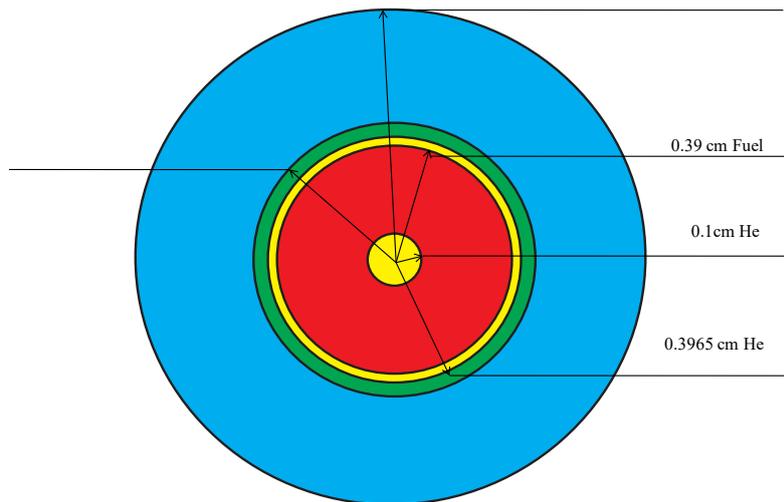


Figure 1 – Fuel zone (tvel) or Fuel with gadolinium (tveg) zone position in 0.39 cm radius

In Figure 2, it is shown that there are 312 rods in the fuel assembly. If  $n$  - fuel with gadolinium rod, then  $312-n$  = fuel rods. In Russian WWER reactors, the ratio of the fuel with gadolinium (tveg) and fuel rods is - 1: 6, 1: 12, 1: 18 and 1: 24. So, 1: 6,  $N$  (Total) = (1+6) = 7,  $312 / 7 \approx 45$  fuel with gadolinium rods and  $(312-45) = 267$  fuel rods. In the same way, for the 1:12,  $N = 13$ ,  $312 / 13 \approx 24$  fuel with gadolinium rods and  $(312-24) = 288$  fuel rods, for the 1:18,  $N = 19$ ,  $312 / 19 \approx 17$  fuel with gadolinium rods and  $(312-17) = 295$  fuel rods, for the 1:24,  $N = 25$ ,  $312/25 \approx 12$  tags and  $(312-25)=300$  fuel rods. In this calculation, we can say that the poly cells model is 1: 6, 1: 12, 1: 18 and 1: 24 and full-scale model is 45: 267, 24: 288, 17: 295 and 12: 300. [9-10]

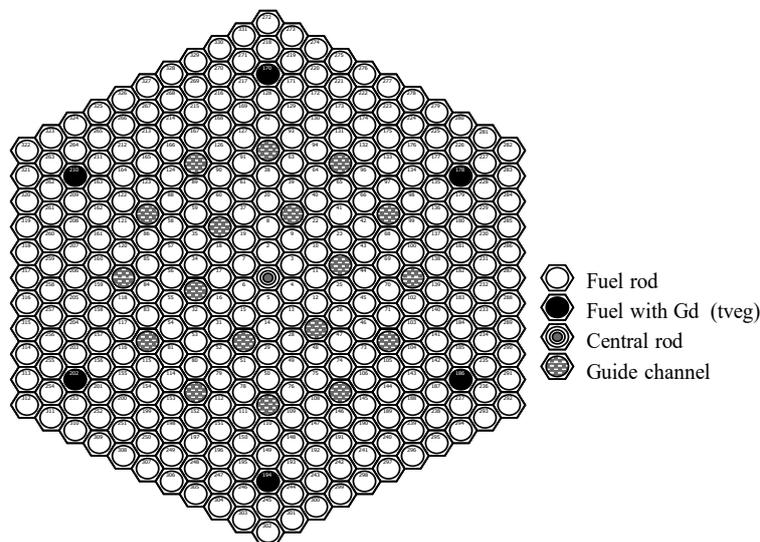


Figure 2 – 312 Fuel rods assembly

### Calculate the multiplying coefficient characteristic for the Full-scale and Poly cells model

For the full-scale fuel assembly (when 45 fuel with gadolinium rods and 267 fuel rods) and poly cells: (1 fuel with gadolinium rod and 6 fuel rods), then the multiplying coefficient vs time was calculated by the program GETERA-93 for the different (0.1%, 0.25%, 0.5%, 0.75% and 1%) concentration of gadolinium, which is shown in the figure 3a and figure 3b respectively. In here full-scale fuel assembly and poly cells are given the same result. [11-12]

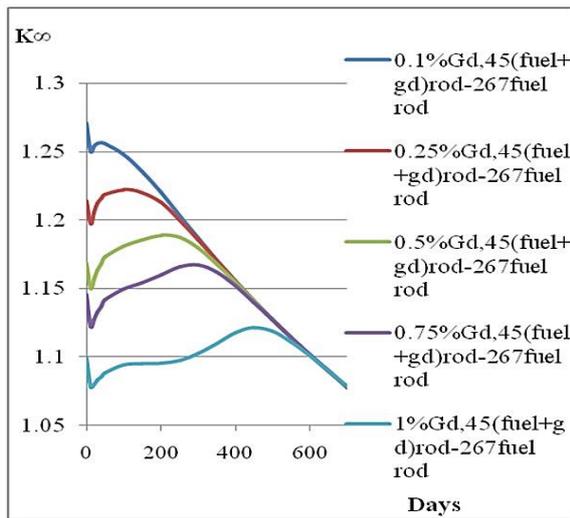


Figure 3a – Multiplying coefficient vs Days in full scale 45 (Fuel+Gd)rods and 267 fuel rods model

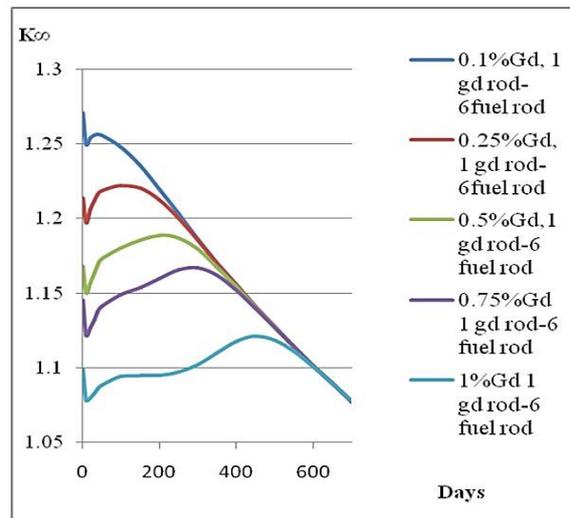


Figure 3b – Multiplying coefficient vs Days in full poly cells 1(Fuel+Gd) rod and 6 fuel rods model

Graph analysis: When the concentration of gadolinium is 0.1% in the full-scale (45 tveg rods and 267 tvelrods) model, then the gadolinium rod (tveg) very soon (approximately 50 days) absorbed neutrons and after that only fuel  $U^{235}$  was burned. In the same way, when a little much more gadolinium 0.25% then approximately 100 day's gadolinium fuel rod absorbed neutrons, after that only fuel  $U^{235}$  was burned. In here it was seen that, more concentration of gadolinium absorbed neutrons for a long time until all gadolinium was burned, and then only fuel  $U^{235}$  was burned. Same result was shown in the poly cells model (fig. 3b).

When in the fuel assembly has 24(Fuel+Gd)rods and 288 fuel rods for the full scale and poly cells 1(Fuel+Gd) rod and 12 fuel rods, then the multiplying coefficient vs days shown in the figure 4a and figure 4b accordingly. But in here, 24 fuel with gadolinium rods which is less than <45 fuel with gadolinium rods. For this reason, for the concentration of (0.5%, 0.75%, 1.5% and 3%) gadolinium, 24 fuel with gadolinium rods absorbed neutrons for a long time and then burned fuel  $U^{235}$ .

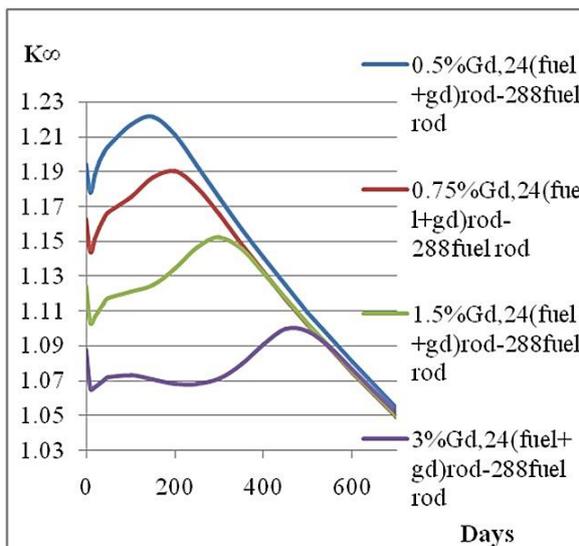


Figure 4a – Multiplying coefficient vs Days in full scale 24 (Fuel+Gd) rods and 288 fuel rods model

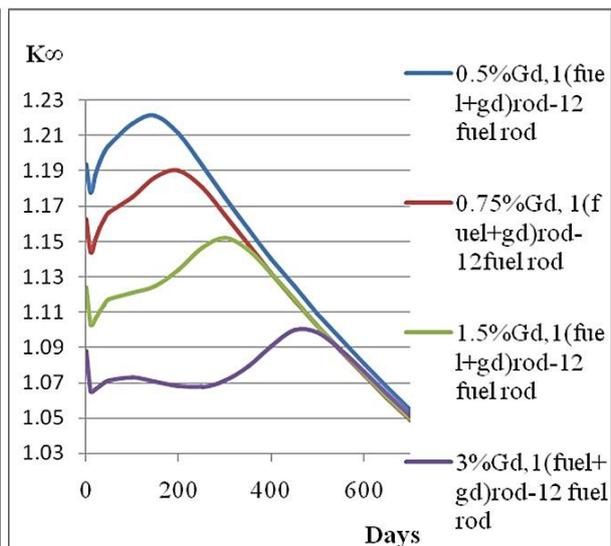


Figure 4b – Multiplying coefficient vs Days in poly cells 1 (Fuel+Gd)rod and 12 fuel rods model

For the fuel assembly 17 (Fuel+Gd) rods and 295 fuel rods and his poly cells 1 (Fuel+Gd) rod and 18 fuel rods, fuel assembly 12 (Fuel+Gd) rods and 300 fuel rods for the

full-scale model and his poly cells model 1 (Fuel+Gd) rod and 24 fuel rods was calculated by the program GETERA-93. Which is shown in figure 5a, 5b and 6a, 6b accordingly.

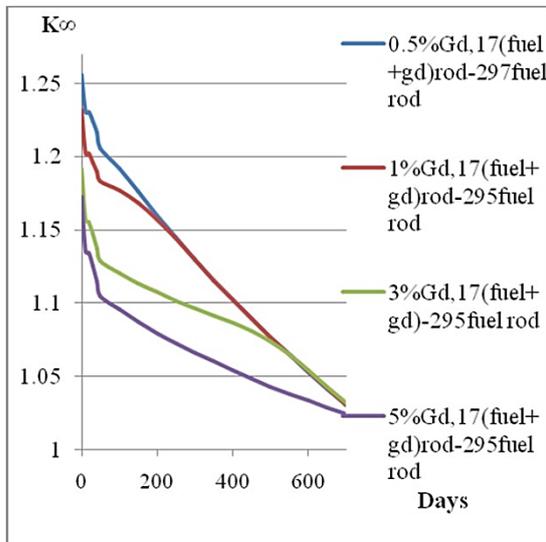


Figure 5a – Multiplying coefficient vs Days in full scale 17 (Fuel+Gd) rods and 295 fuel rods model

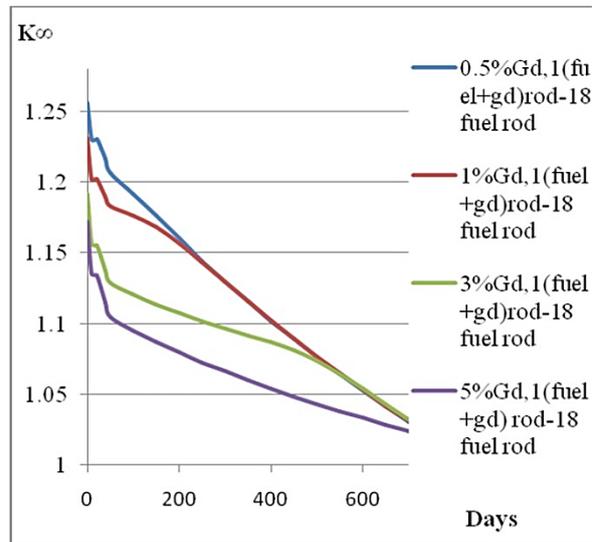


Figure 5b – Multiplying coefficient vs Days in poly cells 1 (Fuel+Gd) rod and 18 fuel rods model

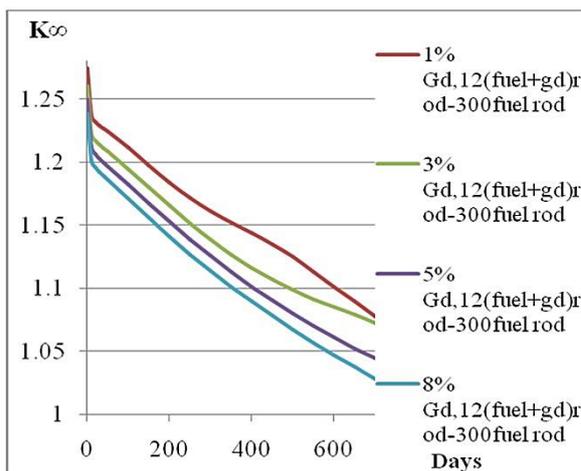


Figure 6a – Multiplying coefficient vs Days in full scale 12 (Fuel+Gd) rods and 300 fuel rods model

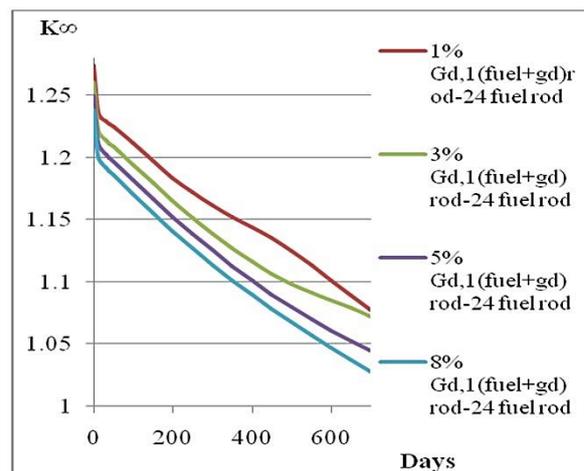


Figure 6b – Multiplying coefficient vs Days in poly cells 1 (Fuel+Gd) rod and 24 fuel rods model

Graph analysis: Figure 5a, 5b and 6a, 6b shows that, when in the full-scale has 17 (Fuel+Gd) rods, then absorption time is less than 12(Fuel+Gd) rods absorption time.

### Result

It is shown that the placement of a burnable absorber in a fuel assembly has both a quantitative and a qualitative effect on the change in the multiplication factor in the process of fuel burnup. It should also be noted that the duration of gadolinium burning depends on its amount and distribution inside the fuel assembly.

### Conclusion

Calculation results on a full-scale model of a WWER polycell simulating fuel assemblies with pin-by-pin nodalization showed that varying the amount and location of the burnable poison inside the fuel assemblies get possible to control the reactivity margin for

burnup and increase the efficiency of nuclear fuel usage in WWER reactors. Such problem is an optimization problem and can be solved by calculation.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Рахман, Анисур С.К.* Сравнение результатов анализа неопределенности в физических расчетах ячеек ВВЭР в суточном графике маневрирования двумя программами GETERA и WIMS / С.К. Анисур Рахман, М.А. Увакин // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30). – С. 90-100.
2. *Рахман, Анисур С.К.* Исследование изменения концентрации поглотителя при работе реактора ВВЭР-1000 в режиме маневрирования / С.К. Анисур Рахман, М.А. Увакин // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 2(35). – С. 83-91.
3. *Anisur, R S K, Uvakin M A*, Uncertainty analysis in the physical calculation of WWER cells in the daily maneuvering schedule. (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1133(1), Article № 012048.
4. *Николаев, А.Л.* Исследование реактивности ВВЭР в режиме с неконтролируемым извлечением группы ОР СУЗ при минимально возможном начальном потоке нейтронов / А.Л. Николаев, М.А. Увакин // Проблемы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – № 2. – С. 170-179.
5. *Петкевич, И.Г.* Анализ неопределенностей результатов расчета режима с разрывом паропровода на установке АЭС-2006 по коду КОРСАР/ГП с применением программы LINQUAD / И.Г. Петкевич, М.А. Увакин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2013. – Вып. 2. – С. 51-60.
6. *Увакин, М.А.* Анализ коэффициентов реактивности ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации с изменением внешней нагрузки / М.А. Увакин, А.П. Демехин // Атомная энергия. – 2017. – № 4. – С. 193-195.
7. *Bryukhin V.V., Kurakin K.Y., Uvakin M.A.* Analysis of the uncertainties in the physical calculations of water-moderated power reactors of the WWER type by the parameters of models of preparing few-group constants. Physics of atomic nuclei, 79, 2016 (8), p. 1305-1314.
8. *Uvakin M.A., Alekhin G.V., Bykov M.A., Zaitsev S.I.* Verification of three-dimensional neutron kinetics model of TRAP-KS code regarding reactivity variations. KERNTECHNIK, 81, 2016 (4), p. 394-400.
9. *Гетья, С.И.* Моделирование температурных неоднородностей в пучке твэлов ТВС ВВЭР-1000 / С.И. Гетья, В.Г. Крапивцев, П.В. Марков, В.И. Солонин // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114, № 1. – С. 69-72.
10. *Аверьянова, С.П.* Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохмянина, Д.А. Злобин, П.Е. Филимонов, В.И. Кузнецов, В.Б. Лаговский // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 3. – С. 123-127.
11. *Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E.* A Study of Boron Dilution in WWER-1000 Reactor. Thermal Engineering. 2002. Vol. 49, № 5. P. 372-376.
12. JANIS Online version, no Java required – Nuclear Energy Agency. <http://www.oecd-nea.org/janisweb/>.

## REFERENCES

- [1] Rahman Anisur S.K., Uvakin M.A. Sravniniye rezul'tatov analiza neopredelennosti v fizicheskikh raschetakh yacheyek WWER v sutochnom grafike manevrirovaniya dvumya programmami GETERA i WIMS [Compare the Result of Uncertainty Analysis in the Physical Calculations of WWER Cells in the Daily Maneuvering Schedule by GETERA and WIMS Programs], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2019, no. 1(30), pp. 90-100 (in Russian).
- [2] Rahman S.K. Anisur, M.A. Uvakin, Issledovaniye izmeneniya kontsentratsii poglotitelya pri rabote reaktora WWER-1000 v rezhime manevrirovaniya [Investigation of Absorber Concentration Changes during Maneuvering Operation in WWER 1000 Reactor], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2020, № 2(35), pp. 83-91 (in Russian).
- [3] Anisur, R S K, Uvakin M A, Uncertainty Analysis in the Physical Calculation of WWER Cells in the Daily Maneuvering Schedule. (2018) Journal of Physics: Conference Series, 1133(1), Article № 012048 (in English).
- [4] Nikolaev A.L., Uvakin M.A. Issledovaniye reaktivnosti WWER v rezhime s nekontroliruyemym izvlecheniyem gruppy or suz pri minimal'no vozmozhnom nachal'nom potoke neytronov. [Investigation of WWER Reactivity in a Mode with Uncontrolled Extraction of a CPS OR Group at

- the Lowest Possible Initial Neutron Flux], Problemy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: YAderno-reaktornye konstanty [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Reactor Constants], 2019, no. 2, pp. 170-179 (in Russian).
- [5] Petkevich I.G., Uvakin M.A. Analiz neopredelennostey rezul'tatov rascheta rezhima s razryvomparoprovoda na ustanovke AES-2006 po kodu KORSAR/GP s primeneniyem programmy LINQUAD [Uncertainty Analysis of the Results of the Calculation of the Mode with a Break in the Steam Pipeline at the AES-2006 Unit Using the KORSAR/GP Code Using the LINQUAD Program], Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernyh reaktorov [Issues of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors], 2013, no. 2, pp. 51-60 (in Russian).
- [6] Uvakin M.A., Demekhin A.P. Analiz koeffitsiyentov reaktivnosti WWER v rezhimakh normal'noy ekspluatatsii s izmeneniyem vneshney nagruzki [Analysis of Reactivity Coefficients of a WWER Reactor in Normal Operation Modes with a Change in External Load]. Atomnaya energiya [Atomic Energy], 2017, vol. 123, no. 4, pp. 193-195 (in Russian).
- [7] Bryukhin V.V., Kurakin K.Y., Uvakin M.A. Analysis of the Uncertainties in the Physical Calculations of Water-Moderated Power Reactors of the WWER Type by the Parameters of Models of Preparing Few-Group Constants. Physics of Atomic Nuclei, 79, 2016 (8), p. 1305-1314. (in English)
- [8] Uvakin M.A., Alekhin G.V., Bykov M.A., Zaitsev S.I. Verification of Three-Dimensional Neutron Kinetics Model of TRAP-KS Code Regarding Reactivity Variations. KERNTECHNIK, 81, 2016 (4), p. 394-400 (in English).
- [9] Getya S.I., Krapivtsev V.G., Markov P.V., Solonin V.I. Modelirovaniye temperaturnykh neodnorodnostey v puchke tvelov TVS WWER-1000 [Modeling Temperature Nonuniformities in a Fuel-Element Bundle of WWER-1000 Fuel Assembly]. Atomnaya energiya [Atomic energy], 2013, v. 114, no. 1, pp. 69-72 (in Russian).
- [10] Averyanova S.P., Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A., Filimonov P.E. Kuznetsov V.I., Lagovsky V.B. Metod ofset-moshchnostnoy fazovoy diagrammy dlya upravleniya energovydeleniyem reaktora [Offset-Power Phase Diagram Method for Controlling the Energy Release of the Reactor]. Atomnaya energiya [Atomic energy], 2016, vol. 121, no. 3, pp. 123-127 (in Russian).
- [11] Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. and others. A Study of Boron Dilution in WWER-1000 Reactor. Thermal Engineering, 2002, vol. 49, no 5, pp. 372-376 (in English).
- [12] JANIS Online version, no Java required – Nuclear Energy Agency. <http://www.oecdnea.org/janisweb/>. (in English).

## Effect of the Burnable Absorber (Gd) on the Multiplying Coefficient ( $K_{\infty}$ ) in the Process of Fuel Burnup for Full-Scale and Poly Cells Models for the WWER Reactor

Rahman S.K. Anisur<sup>1</sup>, Maksim A. Uvakin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bangladesh Atomic Energy Regulatory Authority (BAERA), Authority Bhabon, E-12/A, Agargaon, Dhaka-1207, Bangladesh

<sup>2</sup>National Research Nuclear University (MEPhI), Kashirskoyeshosse, 31, Moscow, Russia 1154091

<sup>1</sup>ranisur01@gmail.com, ORCID iD, 0000-0001-7803-8234, WoSResearcher ID: D-3381-2019

<sup>2</sup>uvakin\_ma@grpress.podolsk.ru, ORCID iD, 0000-0002-4917-1770, WoSResearcher ID: E-1027-2019

Received by the editorial office on 07/15/2022

After completion 09/30/2022

Accepted for publication on 10/12/2022

**Abstract.** The paper considers various concentrations of burnable absorber (BA) Gadolinium (Gd) in the system of compensation of excess reactivity in the reactor of WWER type at the extended campaigns. It is analyzed the influence of the method for the Full-scale and Poly-cells model placing the burnable absorber in the fuel with gadolinium rods (tveg). The strong influence of the BAs composition in the fuel with gadolinium rods (tveg) dependence on the multiplication factor of the fuel burnup is shown.

**Keywords:** burnable absorber, compensation, reactivity, full-scale model, poly-cellular model, multiplication factor, burnup.

**For citation:** Rahman Anisur S.K., Uvakin M.A. Effect of the Burnable Absorber (Gd) on the Multiplying Coefficient ( $K_{\infty}$ ) in the Process of Fuel Burnup for Full-Scale and Poly Cells Models for the WWER reactor // Global Nuclear Safety. 2022. Vol. 4(45). P. 54-60. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-05>.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.524.44 : 62-762.4  
DOI 10.26583/gns-2022-04-06  
EDN HAAEMH

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТЫ УЗЛОВ УПЛОТНЕНИЙ ДЛЯ  
ТРАНСПОРТНЫХ ШЛЮЗОВ ЭНЕРГООБЛОКОВ С ВВЭР-1000  
И ВВЭР-1200 В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ**

© 2022 Кузин Сергей Алексеевич<sup>1</sup>, Кравец Сергей Борисович<sup>2</sup>,  
Парыгин Евгений Владимирович<sup>3</sup>, Краснокутский Виктор Викторович<sup>4</sup>

<sup>1</sup>АО «Атоммашэкспорт», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

<sup>2</sup>ФБУ «Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия

<sup>1,3,4</sup>Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского  
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

<sup>1</sup>KuzinSergey55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7384-5827>

<sup>2</sup>kravets\_sb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>

<sup>3</sup>VITkafAE@mephi.ru

<sup>4</sup>leronil@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4498-2996>

*Аннотация.* Актуальность данной работы определена необходимостью прогнозировать работу узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах. Приведены результаты испытаний резиновых уплотнений на герметичность. На основании исследования выполнена оценка герметичности применяемых резиновых уплотнений и разработаны рекомендации по увеличению надежности работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах.

*Ключевые слова:* ВВЭР-1000, шлюз, резиновые уплотнения, узел, эксплуатационные режимы.

*Для цитирования:* Кузин С.А., Кравец С.Б., Парыгин Е.В., Краснокутский В.В. Прогнозирование работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 61–68. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-06>.

Поступила в редакцию 20.09.2022

После доработки 29.11.2022

Принята к печати 06.12.2022

В настоящее время для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 [1-2] преимущественно используются уплотнения, выполненные из резинотехнических изделий в радиационнстойком исполнении и предназначенные для эксплуатации на объектах атомной энергетики [3-4] в условиях воздействия температур от минус 70<sup>0</sup>С до плюс 200<sup>0</sup>С по ТУ 38 1051325-2008. В конструкции шлюза должно быть предусмотрено разделительное устройство, отделяющее межоболочечное пространство от помещения транспортного шлюза. Допускаемые утечки в атмосферу, минуя фильтры очистки, через уплотнения ворот шлюза, находящегося в положении «шлюз герметичен, исправен», при любых режимах, не должны превышать 0,1 м<sup>3</sup>/сут.

Допускаемые утечки через разделительное устройство, обеспечивающее уплотнение шлюза с наружной оболочкой, не должны превышать  $6,0 \text{ м}^3 / \text{сут}$  при перепаде давления 100 Па. Конструкция ворот шлюза должна предусматривать возможность контроля на герметичность с внешней стороны по отношению к зоне локализации аварии. Такой контроль на герметичность должен проводиться после каждого цикла «открытие-закрытие». Кроме того, должна быть предусмотрена возможность включения режима проверки герметичности с пульта в негерметичном помещении.

С целью прогнозирования работоспособности и герметичности уплотнений, выполненных из резинотехнических изделий в радиационнстойком исполнении из смеси резиновой 51-1758 Рад по ТУ 1051325-2008, использованных для шлюзов Нововоронежской АЭС-2, ОАО «ВНИИАМ» г. Волгодонска были проведены экспериментальные исследования. Работы проводились в соответствии с договором между ОАО «ВНИИАМ» и ЗАО «АЭМ-технологии» и протоколом «О применении на транспортном шлюзе для НВАЭС-2 уплотнений из смеси резиновой 51-1758 по ТУ 1051325-2008» на стенде экспериментальной базы ОАО «ВНИИАМ».

Номенклатура экспериментальных уплотнительных прокладок приведена на рисунках 1 и 2 по ТУ 1051325-2008.

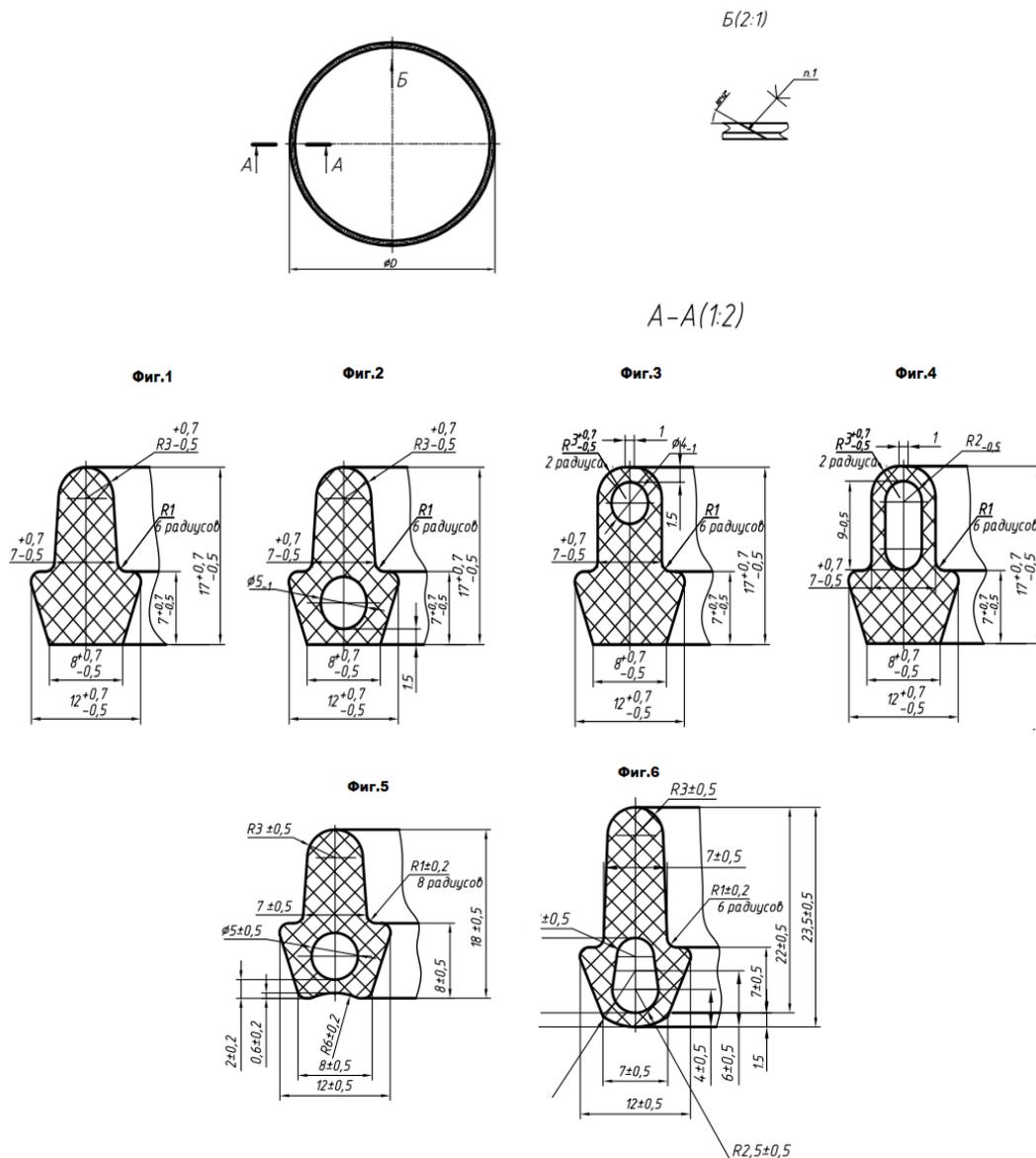


Рисунок 1 – Уплотнения (профили: фиг. 1 – фиг. 6), изготовленные ООО «Атомсинтез» [Seals (profiles: Fig. 1 to Fig. 6) manufactured by Atomsintez Ltd]

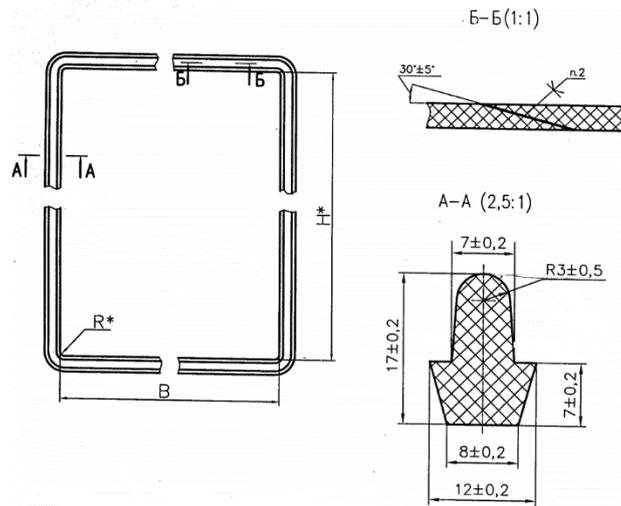


Рисунок 2 – Уплотнение, поставленное ОАО НИИЭМИ [Seal supplied by JSC SRIEMI]

Конструкция прижимных планок, приведена на рисунке 3, испытательной матрицы – на рисунке 4 [5-8].

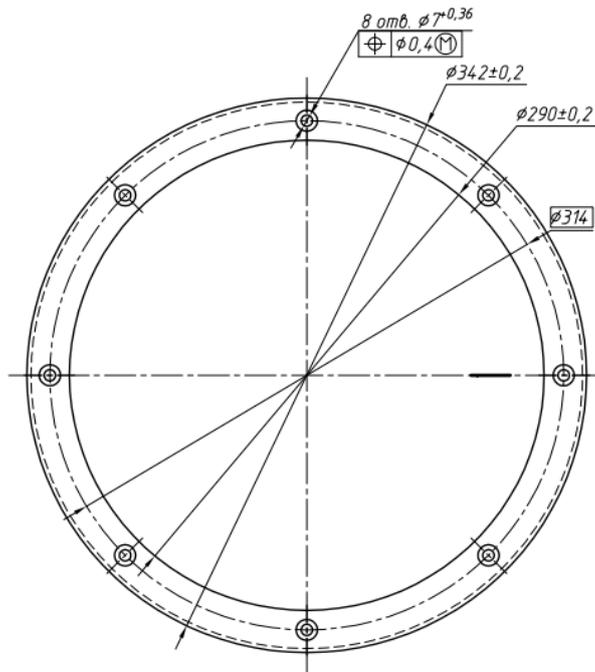


Рисунок 3 – Планка (Кольцо) [Bar (Ring)]

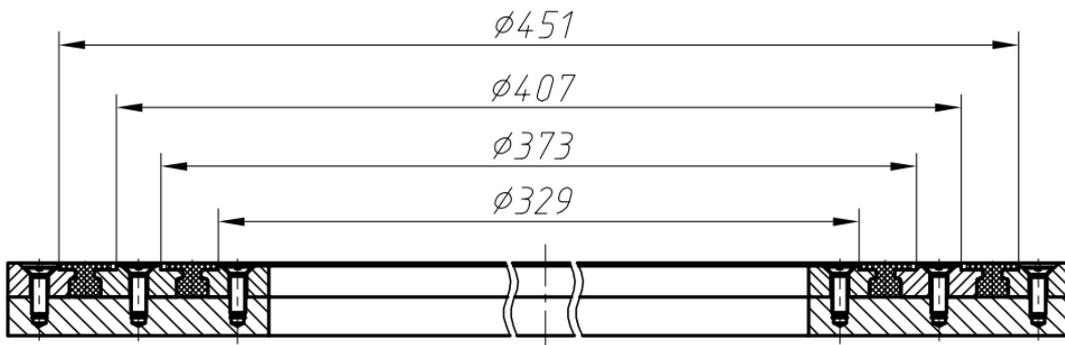


Рисунок 4 – Испытательная матрица [Test matrix]

Для проведения испытаний отобраны и изготовлены профили (см. рис. 1). Уплотнения изготовлены ООО «Атомсинтез». Работа проводилась в соответствии с программой: Резиновые уплотнения оборудования герметичного ограждения АЭС. Программа и методика испытаний АКЦШ 766.00.000 ПМ. Обобщенные результаты испытаний на герметичность уплотнений, изготовленных из различных профилей, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенные результаты испытаний на герметичность уплотнений из различных профилей (см. рис. 1) [Summarised leakage test results for seals made of different profiles (see figure 1)]

№ пп	Тип прокладки	Диапазон прожатия от нагрузки 0 – 3280 кгс, <u>общий диапазон</u> зона герметичности, мм	Величина протечки за 100 с при перепаде $\Delta P=0,4$ МПа, Па	Допустимое значение протечки за 100 с, Па	Заключение о герметичности	Примечание	
1	См. рис. 1, фиг.1	$\frac{0-3,2}{1,89-3,2}$	80 – 40	$\leq 500$ Па*	Соответствует предъявляемым требованиям	Прокладки устанавливались на герметик	
2	См. рис. 1, фиг. 2	$\frac{0-3,75}{1,96-3,75}$	120 – 40	$\leq 500$ Па*	Соответствует предъявляемым требованиям		
3	См. рис. 1, фиг. 3	$\frac{0-3,26}{2,99-3,26}$	240 – 100	$\leq 500$ Па*	Соответствует предъявляемым требованиям		
4	См. рис. 1, фиг. 4	$\frac{0-3,17}{2,3-3,17}$	80 – 50	$\leq 500$ Па*	Соответствует предъявляемым требованиям		
5	См. рис. 1, фиг. 5**	$\frac{0-4,9}{1,9-4,9}$	160 – 70	$\leq 500$ Па*	Соответствует предъявляемым требованиям	Без использования герметика. Пазуха соединена с атмосферой двумя отверстиями $\varnothing 2$ мм	
		0 – 5,2 **	30				
6	См. рис. 1, фиг. 6*** конструкция АМЕ	$\frac{0-4,06}{-}$	Протечка 1200 – 780 Па за 30 секунд в диапазоне от 2,1мм до 4,06	$\leq 500$ Па*	Не соответствует предъявляемым требованиям		
Примечание:							
* – допустимая протечка $\leq 500$ Па за 100 с., определена из условия максимально допустимой протечки $0,4 \text{ м}^3$ через 20 метров уплотнения шлюза за сутки.							
** – усилие для полного обжатия (контакт металл-металл) прокладки превышало $P=3280$ кгс.							
*** – фактический диаметр центрального отверстия составил $\varnothing 2,2$ мм, вместо минимального предусмотренного чертежом отверстия $\varnothing 4$ мм.							

По результатам испытаний на герметичность принято решение о проведении испытаний на работоспособность при циклическом нагружении усилием 2886 кгс двух конструкций уплотнений (1 – см. рис. 1, фиг. 5; 2 – рис. 2). Результаты проверки работоспособности прокладки 1 после наработки 2500, 5000, 7500 и 10000 циклов нагружения представлены в таблице 2, а прокладки 2 после наработки 2500, 5000 циклов нагружения представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Результаты испытаний прокладки 1 на работоспособность и герметичность [Results of function and tightness tests of gasket 1]

1	Обжатие прокладки, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Усилие обжатия										
2	Усилие обжатия проектной прокладки на 1 п/метр уплотнения, кгс	160	310	470	650	910	1250	1800	-	-
3	Усилие обжатия испытуемой прокладки на 1 п/метр уплотнения, кгс	147	297	463	646	856	1083	1388	1698	2061
4	Показатели по п.3 после 2500 циклов	137	275	423	579	765	996	1256	1576	2119
5	Показатели по п.3 после 5000 циклов	135	270	431	609	808	991	1279	1632	2246
6	Показатели по п.3 после 7500 циклов	144	288	428	576	765	956	1278	1482	1916
7	Показатели по п.3 после 10000 циклов	135	270	421	580	822	933	1190	1505	1989
Герметичность (Допустимая протечка $\leq 500$ Па за 100 сек)										
8	Герметичность за 100 сек, Па	негер м.	негер м.	негер м.	160	140	110	80	70	70
9	Показатели по п.8 после 2500 циклов (герметичн.)	негер м.	негер м.	негер м.	130	100	70	50	50	50
10	Показатели по п.8 после 5000 циклов (герметичн.)	негер м.	негер м.	негер м.	150	150	100	80	80	70
11	Показатели по п.8 после 7500 циклов (герметичн.)	негер м.	негер м.	негер м.	160	100	90	90	90	70

Таблица 3 – Результаты испытаний на работоспособность прокладки 2 (с герметиком) [Test results of gasket 2 (with sealant)]

Усилие обжатия, кгс	Исходное состояние		После наработки 2500 циклов		После наработки 5000 циклов	
	Обжатие, мм	Протечки, Па	Обжатие, мм	Протечки, Па	Обжатие, мм	Протечки, Па
374	0,99	негерм. >500 Па	0,9	негерм. >500 Па	0,91	негерм. >500 Па
688	1,45	негерм. >500 Па	1,39	негерм. >500 Па	1,54	40
1002	2,0	40	1,99	50	2,21	40
1316	2,42	40	2,33	40	2,45	40
1630	3,01	30	2,82	40	2,81	50
1944	3,52	30	3,0	40	3,07	30
2258	3,76	30	3,21	40	3,24	30
2572	3,97	20	3,43	40	3,45	40
2886	4,11	20	3,7	30	3,64	30
3200	4,17	20	3,75	30	3,71	30

Узел уплотнения разделительного устройства для шлюза современного блока с ВВЭР-1000 показан на рисунке 4.

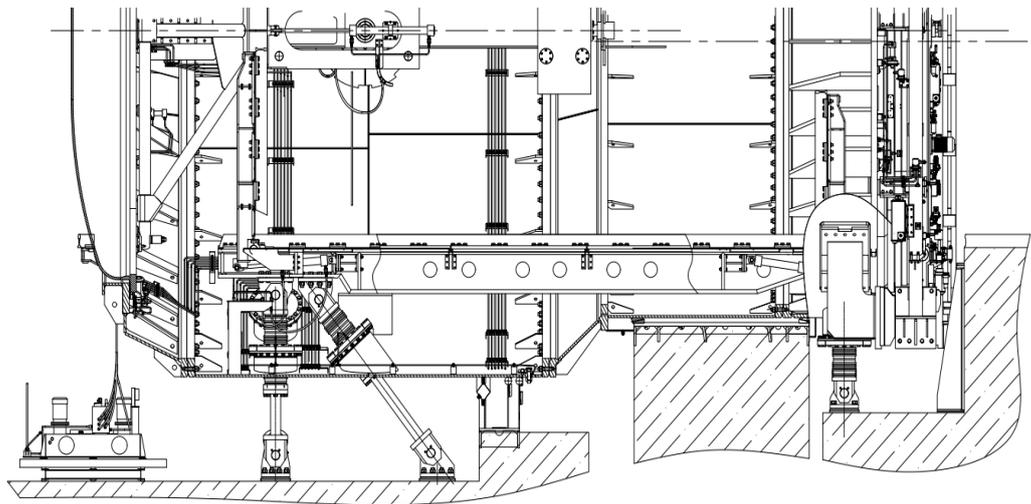


Рисунок 4 – Узел разделительного устройства шлюза [Gateway separator unit]

Резиновые уплотнения в районе узла уплотнения внутренних ворот и уплотнения разделительного устройства для транспортного шлюза АЭС блока с ВВЭР-1000 в режиме ЗПА должны обеспечивать герметичность шлюза при температуре уплотнений не более 200°C.

Данное требование проверяется в районе узла уплотнения внутренних ворот и уплотнения разделительного устройства для транспортного шлюза АЭС блока с ВВЭР-1000 в режиме ЗПА. В режиме ЗПА подразумевается разрыв с двусторонним истечением теплоносителя из ГТЦ с наложением полного обесточивания и отказом ГЕ-2. При анализе этой аварии важны результаты испытаний по усилию обжатия резиновых уплотнений.

Выводы:

1. Усилие обжатия прокладки 1 (см. рис. 1, фиг. 5) ниже значений усилия для проектной прокладки при одинаковых величинах обжатия.

2. После наработки 10000 циклов нагружения упругие свойства прокладки (см. рис. 1, фиг. 5) сохранились (величины прожатия прокладки от заданной нагрузки остались практически неизменными). Видимых повреждений и нарушений целостности прокладки не обнаружено. Прокладка сохранила способность обеспечивать герметичность в диапазоне обжатия определенном до циклической наработки.

3. После наработки 5000 циклов нагружения упругие свойства прокладки 2 (см. рис. 2) сохранились (с использованием герметика). Видимых повреждений и нарушений целостности прокладки не обнаружено. Прокладка сохранила способность обеспечивать герметичность в диапазоне обжатия определенном до циклической наработки.

4. На основании результатов испытаний для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 рекомендуются к применению уплотнения, выполненные в виде профиля 1 (см. рис. 1, фиг. 5) с диаметром отверстия  $\varnothing 2,2$  мм из смеси резиновой 51-1758 Рад по ТУ 1051325-2008.

5. Данные результаты испытаний уплотнений можно использовать при проектировании шлюза, получения напряженно-деформированного состояния шлюза в эксплуатационных режимах и показателей надежности с учетом прогнозируемых циклических и температурных нагрузок на конструкции уплотнительных узлов шлюза [9-14].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Основные положения НП-001-15.* – URL : <http://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciiy.html>.
2. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86.* – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
3. *Уплотнения и уплотнительная техника: справочник* / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер [и др.]; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 464 с.
4. *Макаров, В.Г. Уплотнительные устройства* / В.Г. Макаров. – Ленинград : Машиностроение, 1973. – 232 с.
5. *ГОСТ 15.309-98 СРПП. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка. Основные положения.* – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999.
6. *СПАС-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций.* – Москва : НТЦ ЯРБ, 2003.
7. *ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия.* – Москва : Стандартиформ, 2010.
8. *ГОСТ 2.601-2006. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы.* – Москва : Стандартиформ, 2008.
9. *Данюшевский, И.А. Об оценке прочности и ресурса энергооборудования с позиций современных возможностей* / И.А. Данюшевский, Е.В. Георгиевская, С.Н. Гаврилов, Л.Д. Власова // *Надежность и безопасность энергетики.* – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 237-242. – URL : <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-3-237-242>.
10. *Гаев, А.В. Разработка методики оценки надежности и безопасности тепломеханического оборудования* / А.В. Гаев, И.А. Данюшевский, Р.Э. Шевчук, Д.Н. Журавлев // *Надежность и безопасность энергетики.* – 2015. – № 2. – С. 65-69.
11. *Клемин, А.И. Инженерные вероятностные расчеты при проектировании ядерных реакторов* / А.И. Клемин. – Москва : Атомиздат, 1973. – 304 с.
12. *Надежность машин Т IV-3* / В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин [и др.]; под общ. ред. В.В. Клюева. – Москва : Машиностроение, 2003. – 592 с.
13. *Семенов, В.К. К вопросу прогнозирования ресурса теплоэнергетического оборудования тепловых и атомных электрических станций* / В.К. Семенов, В.П. Дерий, В.С. Щербнев, В.Ф. Степанов // *Вестник ИГЭУ.* – 2007. – № 2. – С. 30-33.
14. *РБ-100-15. Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных электростанций важных для безопасности и их функций.* – Москва : НТЦ Промбезопасность, 2016.

## REFERENCES

- [1] *Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnyh stancij. Osnovnye polozheniya NP-001-15* [General Provisions for Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants. Basic Provisions NP-001-15], URL: <http://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciiy.html> (in Russian).
- [2] *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnyh energeticheskikh ustanovok PNAE G-7-002-86* [Strength Calculation Standards for Equipment and Pipelines of Nuclear Power Installations PNAE G-7-002-86]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 525 p. (in Russian).
- [3] *Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik* [Seals and Sealing Technology: Handbook], edited by Golubev A.I., Kondakov L.A. Moscow: Mechanical Engineering, 1986, 464 p. (in Russian).
- [4] *Makarov V.G. Uplotnitel'nye ustrojstva* [Sealing Devices]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1973, 232 p. (in Russian).
- [5] *GOST 15.309-98 SRPP. Sistema razrabotki i postanovki produkci na proizvodstvo. Ispytaniya i priemka. Osnovnye polozheniya* [STATE STANDARD 15.309-98 SRPP. System Of Product Development and Launching into Production. Testing and Acceptance. General Provisions]. Moscow. IPK Publishing Standards, 1999 (in Russian).
- [6] *SPAS-03. Sanitarnye pravila proektirovaniya i ekspluatatsii atomnyh stancij* [SPAS-03. Sanitary Rules for the Design and Operation of Nuclear Power Plants]. Moscow: NRS STC, 2003 (in Russian).
- [7] *GOST 15150-69. Mashiny, pribory i drugie tekhnicheskie izdeliya* [STATE STANDARD 15150-69. Machines, Appliances and Other Technical Products]. Moscow: Standardinform, 2010 (in Russian).

- [8] GOST 2.601-2006. Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii. Eksploatacionnye dokumenty. Sb. GOSTov [STATE STANDARD 2.601-2006. Unified System for Design Documentation. Operational Documents. Collection of State Standards]. Moscow: Standardinform, 2008 (in Russian).
- [9] Danyushevskij I.A., Georgievskaya E.V., Gavrilov S.N., Vlasova L.D. Ob ocenke prochnosti i resursa energooborudovaniya s pozicij sovremennyh vozmozhnostej. [Assessment of the Durability and Service Life of Energy Equipment from the Perspective of Current Capabilities], *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and Safety in Power Engineering], 2017, vol. 10, no. 3, pp. 237-242, URL: <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-3-237-242> (in Russian).
- [10] Gaev A.V., Danyushevskij I.A., Shevchuk R.E., Zhuravlev D.N. Razrabotka metodiki ocenki nadezhnosti i bezopasnosti teplomekhanicheskogo oborudovaniya [Development of Methodology for Assessing the Reliability and Safety of Thermal-Mechanical Equipment], *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and Safety in Power Engineering], 2015, no. 2, pp. 65-69 (in Russian).
- [11] Klemin A.I. Inzhenernye veroyatnostnye raschety pri proektirovanii yadernyh reaktorov [Engineering Probabilistic Calculations in Nuclear Reactor Design]. Moscow: Atomizdat, 1973, 304 p. (in Russian).
- [12] Klyuev V.V., Bolotin V.V., Sosnin F.R. Nadezhnost' mashin. T IV-3 [Machine Reliability. T IV-3], edited by Klyuev V.V. Moscow: Mechanical Engineering, 2003, 592 p. (in Russian).
- [13] *Semenov, V.K.* K voprosu prognozirovaniya resursa teploenergeticheskogo oborudovaniya teplovyh i atomnyh elektricheskikh stancij [The Forecasting of the Service Life of Thermal Power Equipment in Thermal and Nuclear Power Plants], *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Energy University], 2007, № 2, pp. 30-33 (in Russian).
- [14] RB-100-15. Rekomendacii po poryadku vypolneniya analiza nadezhnosti sistem i elementov atomnyh elektrostancij vazhnyh dlya bezopasnosti i ih funkcij [RB-100-15. Recommendations on How to Perform a Reliability Analysis of Safety-Relevant Systems and Components of Nuclear Power Plants and Their Functions]. Moscow: STC Promsobesnost, 2016 (in Russian).

### Forecasting the Operation of Sealing Joints of Transport Locks of WWER-1000 and WWER-1200 Power Units in Operational Modes

**Sergei A. Kuzin<sup>1</sup>, Sergei B. Kravets<sup>2</sup>, Evgeny V. Parygin<sup>3</sup>, Viktor V. Krasnokutsky<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>JSC «Atommasheksport», Karl Marx Avenue, 44, Volgogradsk, Russia 347360

<sup>2</sup>Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Malaya Krasnoselskaya St., 2/8, bld.5, Moscow, Russia 107140

<sup>1,3</sup>Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgogradsk, Rostov region, Russia 347360

<sup>1</sup>KuzinSergey55@mail.ru; ORCID iD: 0000-0002-7384-5827

<sup>2</sup>kravets\_sb@mail.ru; ORCID iD: 0000-0001-8297-3102; WosResearcher ID: F-7817-2017

<sup>3</sup>VITikafAE@mephi.ru

<sup>4</sup>leronil@mail.ru; ORCID iD: 0000-0002-4498-2996

*Received by the editorial office on 09/20/2022*

*After revision on 11/29/2022*

*Accepted for publication 12/06/2022*

*Abstract.* The relevance of this work is determined by the need to predict the operation of sealing joints of transport locks of WWER-1000 and WWER-1200 power units in operational modes. The results of tests of rubber seals for tightness are given. Based on the study, the tightness of the rubber seals used was assessed and recommendations are developed to increase the reliability of the sealing joints of transport locks of WWER-1000 and WWER-1200 power units in operational modes.

*Keywords:* WWER-1000, airlock, rubber seals, joint, operating modes.

*For citation:* Kuzin S.A., Kravets S.B., Parygin E.V., Krasnokutsky V.V. Forecasting the Operation of Sealing Joints of Transport Locks of WWER-1000 and WWER-1200 Power Units in Operational Modes // *Global Nuclear Safety*. 2022. Vol. 4(45). P. 61-68. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-06>

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
OPERATION OF FACILITIES  
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5.0 : 621.039.519  
DOI 10.26583/gns-2022-04-07  
EDN HFCGGJ

**ВЛИЯНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ  
ТОПЛИВА НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АКТИВНОЙ ЗОНЫ С ВВЭР-1000 (1200)**

© 2022 Малкави Рашдан Талал Аль<sup>1</sup>, Заидан Лаит Джамиль<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иорданский исследовательский и учебный реактор (JRTR), Ирбид, Иордания

<sup>2</sup>Техасский университет A&M, Колледж Стейшн, Техас

<sup>1</sup>rashdanmalkawi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4458-7264>

<sup>2</sup>L.zaidan@tamu.edu, <https://orcid.org/0000-0001-8355-7207>

*Аннотация.* В работе представлены результаты исследований физических явлений, определяющих параметры ксеноновых колебаний. В том числе уточнена зависимость нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000 (1200) от температурного распределения в топливе и его влияния на параметры ксеноновых процессов в зоне. Разработан усовершенствованный метод расчета резонансного поглощения в  $^{238}\text{UO}_2$  (эффект доплеровской реактивности) с неоднородным температурным профилем. Результаты расчета параметров ксеноновых колебаний были рассчитаны с помощью комплексной программы PROSTOR. Валидность усовершенствованного метода была проверена путем сравнения рассчитанных параметров ксенона с результатами измерений, полученными при пусконаладочных испытаниях энергоблоков реактора ВВЭР-1000. Результаты показали более точный расчет резонансного поглощения в  $^{238}\text{UO}_2$ , они значительно уменьшают стабилизацию уширения эффекта Доплера, следовательно, эти факты имеют жизненно важное значение в случае работы реактора в маневренных режимах, сопровождающегося ксеноновыми процессами в активной зоне. Усовершенствованный способ внедрен в компьютерное программное обеспечение Полномасштабного тренажера 3-го энергоблока Ростовской АЭС и полномасштабного тренажера 4-го энергоблока Калининской АЭС. Метод был опробован в ходе приемно-сдаточных испытаний этих полномасштабных тренажеров.

*Ключевые слова:* ВВЭР-1000, ксеноновые колебания, реактивность, эффект Доплера, распределение температуры топлива.

*Для цитирования:* Аль Малкави Р.Т., Заидан Л.Д. Влияние зависимости распределения температуры топлива на нейтронно-физические характеристики активной зоны с ВВЭР-1000 (1200) // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 69-78. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-07>.

Поступила в редакцию 20.07.2022

После доработки 03.10.2022

Принята к печати 12.10.2022

## Introduction

This study, as well as other similar studies, relates to the problems of determining the so-called «small effects» in reactor physics. In most cases, small effects are usually limited to reactor operations and manual troubleshooting, or minor design changes of certain units of nuclear power plant. However, the appearance of small effects is not only a result of manufacturing tolerances and structural failures but also physical phenomena, which are

unaccounted in the computational justification of the NPP project, and important for some operational modes. These phenomena are clearly seen when the reactor operates in load following modes [1, 2], which induce axial Xenon oscillations. Nowadays one of the main requirements for current NPP designs is to operate on load-following mode, in order to be able to adapt daily, and seasonal electricity supply, or any other variations in power demand.

Many studies have investigated the influence of fuel temperature distribution on resonance capture by U-238 [3-6]. The steady state radial temperature distribution across the fuel pellet forms a parabolic curve, in which the center of the fuel pellet acquires the highest temperature, which decreases down to its minimum value at the pellet surface.

In order to study temperature profile across the pellet, 1D cylindrical heat conduction equation with a heat source ( $q$ ) is utilized with a zero-gradient temperature at the center  $\frac{dT}{dx} = 0$ , and a defined heat transfer coefficient at the surface ( $h$ ) – equation (1). The presence of forced convection at the surface justifies the temperature drop across the pellet. Thermal conductivity ( $\lambda$ ) is assumed to be constant.

$$T(r) = \frac{T_0 + q/4r^2}{\lambda(1 - (r/r_0)^2)} \quad (1)$$

where  $r_0$  – the outer radius of the fuel element,  $T_0$  – the surface temperature of the fuel element.

Fuel temperature distribution can be constant along to the radius only in the absence of heat release in the fuel pellet or in a very rapid growth of heat release (acceleration at prompt neutrons) from the cold state of the reactor without power from fractions of a second.

Complex program PROSTOR was adopted in modeling. The main goal of the program PROSTOR, is the implementation of coordinated both neutronics and thermal hydraulics calculations of stationery and transient processes in primary system equipment to integrate modeling of protection and control system work at NPP with WWER-1000 [7, 8].

### Methodology

Stationary and dynamic processes occurring in the reactor require thermal hydraulic calculations to find temperature and power distributions in the core. Accordingly, these calculations will be used to find all constants the averaged fuel temperature as shown in equation (2).

$$\bar{T} = \frac{\int T(r)r dr}{\int r dr}, \quad (2)$$

equation 2 shows that temperature distribution  $T(r)$  can differ depending on the power density of the fuel pellet and/or the heat transfer coefficient at the pellet surface, and this change in the temperature across the pellet might neutron capture cross section in the fuel. In other words, the lower the temperature near the pellet surface, the lower the probability for resonance capture. However, external fuel layers shield the central regions of the fuel; thus, the effect of resonance broadening is lower in the central regions.

In WWER-1000 [9], reactivity feedback due to fuel temperature is mainly caused by resonance capture of neutrons and a first approximation of the resonance absorption integral is shown in equation (3), where  $T_0$  is assumed to be 293 K.

$$I(T) = I(T_0)(1 + \beta(\sqrt{T} - \sqrt{T_0})), \quad (3)$$

where,  $I(T)$ ,  $I(T_0)$  are the temperature dependent resonance absorption integrals;  
 $\beta$  is an experimentally measured constant factor.

This expression implies that the whole region is occupied by a fuel of the same temperature.

### Temperature distribution and resonance absorption

Temperature profile along the fuel pellet radius is calculated, which is necessary to correctly calculate heat flows into the coolant and to determine the maximum fuel temperature. This is solved numerically for more accurate calculations in the case of non-stationary heat transfer equation, at least for one-dimension.

During preparation of neutron cross section libraries, a series of fuel cell calculations is conducted with different values of the fuel temperatures, which is held for the whole fuel volume. Therefore, neutron cross sections used in the neutron-physical calculations, which correspond to the fuel cell, are related to the same temperature in the whole fuel cell volume.

Calculating the temperature profile for neutron cross sections preparation stage is unreal; because it could be the most diverse profile depending on the local power varying in the core, see figure 1. Therefore, another way is suggested to calculate the real temperature profile, which will be used to calculate the neutron cross-sections in the resonance energy region.

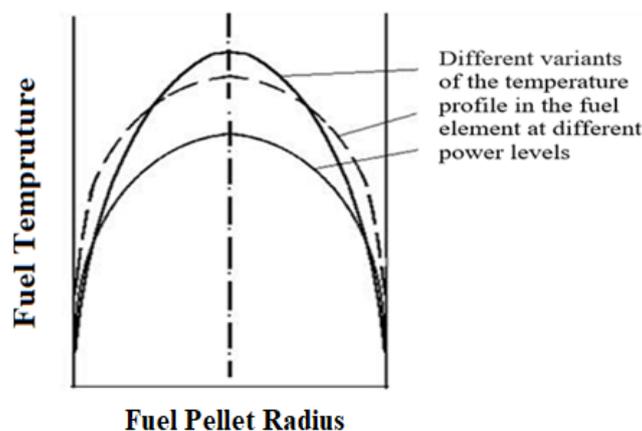


Figure 1 – Variants of the temperature profile in the fuel

There are a couple of factors to determine the temperature distribution in the fuel cell. Starting from the second equation, the neutron resonance capture is proportional to the value  $\sqrt{T(r)}$  in the case of homogeneous distribution of a neutron collision density in the resonance region. This leads to a decrease of the resonance capture probability compared to the resonance capture calculated over an average temperature.

Self-shielding effect should be put into considerations as a factor. Self-shielding plays an important role, where it reduces neutron capture near the center of the fuel pellet compared to the surface. This in turn leads to a decrease in the total resonance calculated depending on the average temperature.

Based on this, the effective fuel temperature should be evaluated, which is homogeneous over the fuel volume, where the value of resonance capture is the same as in the real radial profile.

Accordingly, it could be possible to use the effective fuel temperature for the interpolation of neutron cross sections in the complex codes, which are prepared using spectral program, regardless of the Doppler Effect value distortion.

Reference [3] proposes that the infinite multiplication factor  $K_{\infty}$ , which is calculated in a regular fuel cell has the same value in both cases, either  $K_{\infty}$  regarding the effective average temperature, or in the case of actual parabolic temperature profile along the radius of the fuel.

It was also concluded that there is a more accurate approach for temperature averaging than the illustrated above in equation 2, because equation 2 doesn't consider the weighting factor as in equation 3. The effective fuel temperature was estimated as follows:

$$T_{\text{эфф}} = \frac{\int T(r) \varphi(r) r dr}{\int \varphi(r) r dr}, \quad (4)$$

where the weighting factor formula:  $\varphi(r) = 1/\sqrt{T(r)}$ .

This is considered as the currently accepted method. However, This approach does not the effect of self-shielding in the fuel. This concerns the effect of scattered neutrons in the water, which have reached the surface of fuel pellet, falling into the resonance.

Accurate calculation of the fuel temperature profile along the fuel radius requires a more detailed partitioning of the fuel radially than what was done in [3], division of the fuel pellet into 8 layers leaves each layer optically "gray" for resonance neutrons.

A simplified model was developed to calculate the resonance neutron absorption of the resolved-resonance region in the fuel pellet.

Parameters of WWER-1000 type fuel cell (fig. 2), and eight resolved resonances of  $^{238}\text{U}$  from 6 eV to 200 eV were taken into consideration.

Neutrons will be divided in two categories depending on whether they scattered in moderator or in the fuel, where they will fall in eight resolved resonances of  $^{238}\text{U}$ .

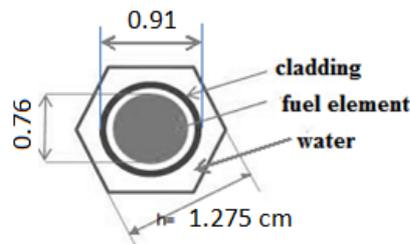


Figure 2 – WWER-1000 fuel cell

Now, the effective fuel temperature can be estimated with a non-uniform temperature profile. The total number of neutrons that absorbed by the energy region of 8 resolved resonances is:

$$F(T_0, T_1, \dots, T_N) = \sqrt{\frac{T_N}{300}} \left( (1 - \alpha) \sum_{j=1}^8 \frac{h_j}{E_j} I_{Sj}(T_0, T_1, \dots, T_N) + \alpha \sum_{j=1}^8 \frac{h_j}{E_j} I_{Mj}(T_0, T_1, \dots, T_N) \right), \quad (5)$$

where:  $h_j$  The width of the j-th resonance;

$E_j$  j-th resonance peak energy;

$T_0$  The value of temperature at the surface of the fuel pellet;

$T_N$  The maximum temperature in the fuel pellet (K);

$\sqrt{T_N/300}$  broadening of the resonance with increasing temperature.

The parameter  $\alpha$  is defined as follows:

$$\alpha = \frac{S_{\text{UO}_2} \Sigma_{\text{SUO}_2}}{P_{\text{U}} S_{\text{H}_2\text{O}} \Sigma_{\text{SH}_2\text{O}} + S_{\text{UO}_2} \Sigma_{\text{SUO}_2}} S_{\text{H}_2\text{O}} - \text{The area occupied by water in a regular fuel cell;}$$

$\Sigma_{\text{SH}_2\text{O}} = \Sigma_{\text{SH}_2} + \Sigma_{\text{SO}}$  – Macroscopic scattering cross section of neutrons in the water;

$S_{UO_2}$  – The area occupied by the fuel in a regular fuel cell;

$\Sigma_{sUO_2} = \Sigma_{sU} + \Sigma_{sO_2}$  – Macroscopic scattering cross section of neutrons in the fuel;

$$P_U \approx \frac{\pi d_U}{\pi d_U + 2\sqrt{3}h} \frac{1}{\Sigma_{sh_2o} \ell_i + \frac{\pi d_U}{\pi d_U + 2\sqrt{3}h}}$$

$$\ell_i = \frac{2\sqrt{3}h^2 - \pi d_T^2}{2\sqrt{3}h + \pi d_T}$$

$d_U$  – Fuel pellet diameter,  $d_T$  – Cladding outside diameter;

$$I_{Sj} = \sqrt{T_0/T_N} W_{j0}(R_0, T_N) + \sum_{i=1}^N (\sqrt{T_i/T_N} - \sqrt{T_{i-1}/T_N}) W_{ji}(R_i, T_i) \prod_{j=1}^i P_{jk}$$

$$\prod_{j=1}^i P_{jk} \approx \prod_{k=1}^i R_k/R_{k-1} = R_i/R_0$$

$$I_{Mj} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{R_0^2} \Delta R_i \left( \sqrt{\frac{T_i}{T_N}} W_{ji}(R_i, T_i) + \sum_{k=i+1}^N \left( \sqrt{\frac{T_k}{T_N}} - \sqrt{\frac{T_{k-1}}{T_N}} \right) W_{jk}(R_k, T_i) \frac{R_k}{R_i} \right) \right.$$

$$\left. + \sqrt{\frac{T_0}{T_N}} W_{ji}(R_0 - R_i, T_0) + \sum_{k=1}^{i-1} \left( \sqrt{\frac{T_k}{T_N}} - \sqrt{\frac{T_{k-1}}{T_N}} \right) W_{jk}(R_k - R_i, T_i) \right) / \sum_{i=1}^N \frac{2R_i}{R_0^2} \Delta R_i$$

The value  $I_{Mj}$  is the absorption probability of neutrons that scattered in the fuel in one of the 8 resonances with a non-uniform temperature profile along the radius, and the value  $I_{Sj}$  is the absorption probability of neutrons that scattered in the water in one of the 8 resonance with a non-uniform temperature profile along the radius. Then the absorption probability in each fuel layer:

$$W_{ji}(R_i, T_i) \approx \frac{\sigma_r(300) \sqrt{300/T_i} \ell_i}{1 + \sigma_r(300) \sqrt{300/T_i} \ell_i}, \ell_i = 2R_i,$$

where  $T_i$  – The value of temperature in i-th layer of the fuel pellet;

$\sigma_r(300)$  – A resonant absorption cross section at  $T=300$  K.

$$W_{jk}(R_k - R_i, T_0) \approx \frac{\sigma_r(300) \sqrt{300/T_0} \ell_i}{1 + \sigma_r(300) \sqrt{300/T_0} \ell_i}, \ell_i = 2(R_k - R_i),$$

where  $R_i$  – The radius of fuel pellet in i-th layer.

The effective temperature value is substituted in equation (5), and then another equation that has the same parameters as equation 5 except one parameter ( $T_{\text{eff}}$ ) was obtained to determine its value:

$$\begin{aligned}
F(T_{eff}) &= \sqrt{\frac{T_{eff}}{300}} \left( (1 - \alpha) \sum_{j=1}^8 \frac{h_j}{E_j} I_{Sj}(T_{eff}) + \alpha \sum_{j=1}^8 \frac{h_j}{E_j} I_{Mj}(T_{eff}) \right) \\
I_{Sj}(T_{eff}) &= W_{j0}(R_0, T_{eff}) \\
I_{Mj}(T_{eff}) &= \left( \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{R_0^2} \Delta R_i (W_{ji}(R_i, T_{eff}) + W_{ji}(R_0 - R_i, T_{eff})) \right) / \sum_{i=1}^N \frac{2R_i}{R_0^2} \Delta R_i \\
F_0(T_{eff}) &= (1 - \alpha) \sum_{j=1}^8 \frac{h_j}{E_j} I_{Sj}(T_{eff}) + \alpha \sum_{j=1}^8 \frac{h_j}{E_j} I_{Mj}(T_{eff}) \\
F(T_0, T_1, \dots, T_N) &= \sqrt{\frac{T_{eff}}{300}} F_0(T_{eff}) \tag{6}
\end{aligned}$$

### Xenon oscillation

Xenon oscillation can be represented as a convergent or divergent harmonic oscillation in the following form:

$$A(t) = A(t_0) \exp(\alpha(t - t_0)) \cos(\omega(t - t_0)) \tag{7}$$

where  $A(t) = A_o(t) - A_o^*$ ;

$A_o(t)$  – The absolute value of the offset at the time  $t$ ;

$A_o^*$  – The equilibrium offset;

$t_0$  – The moment of reaching first absolute;

$\omega = 2\pi/T_{Xe}$ ;  $T_{Xe}$  – the period of xenon oscillations;

$\alpha$  – stability index,  $\alpha = T^{-1} \times \ln(A_2/A_1)$ ,  $A_1$  is the amplitude of the first maximum,  $A_2$  is the amplitude of the second maximum.  $\alpha$  defines the type of harmonic oscillation, if  $\alpha > 0$  oscillation diverges, and if  $\alpha < 0$  oscillation converges.

Xenon oscillations were excited by the immersion of the control rods (CR) for 20 % of the reactor height. Due to this the configuration of the axial power distribution was changed, and then control rods were maintained for 3 hours. The reactor power was set to be 75% by changing the critical concentration of boric acid.

Axial oscillations are described by axial offset-AO (the percentage of the power difference between the upper and lower halves of the core to the total power) [10-13].

### Results

The results for Xenon oscillations were obtained during the commissioning tests for the first cycle of Rostov's NPP 3<sup>rd</sup> unit and 9<sup>th</sup> cycle for 3<sup>rd</sup> unit of Kalinin NPP. The calculations were done using three methods; the effective fuel temperature, the currently accepted method, and by the proposed method in this paper (equation 5). The calculations were performed using "PROSTOR".

Figure 3 shows the axial offset as a function of time for Xenon oscillations of the initial core for 3<sup>rd</sup> unit of Rostov NPP at 75% of nominal power. It can be noticed that there is a significant difference in Xenon oscillations among the three methods. Furthermore, the improved method indicates the importance of considering the dependence effective temperature value on the coolant density to obtain more accurate results for the neutron flux distribution.

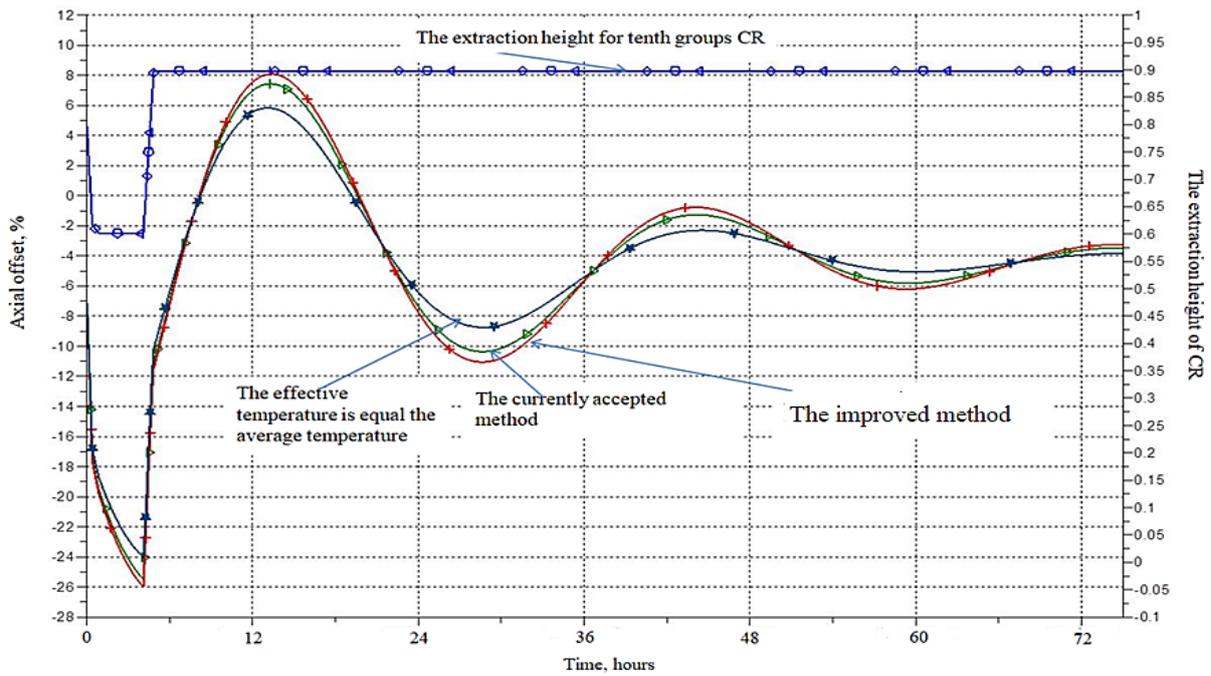


Figure 3 – Axial offset as a function of time of the initial core for 3rd unit of Rostov NPP at 75% of nominal power

Figure 4 shows the axial offset as a function of time for Xenon oscillations at the end of 9<sup>th</sup> fuel cycle for 3<sup>rd</sup> unit of Kalinin NPP at 100% of nominal power.

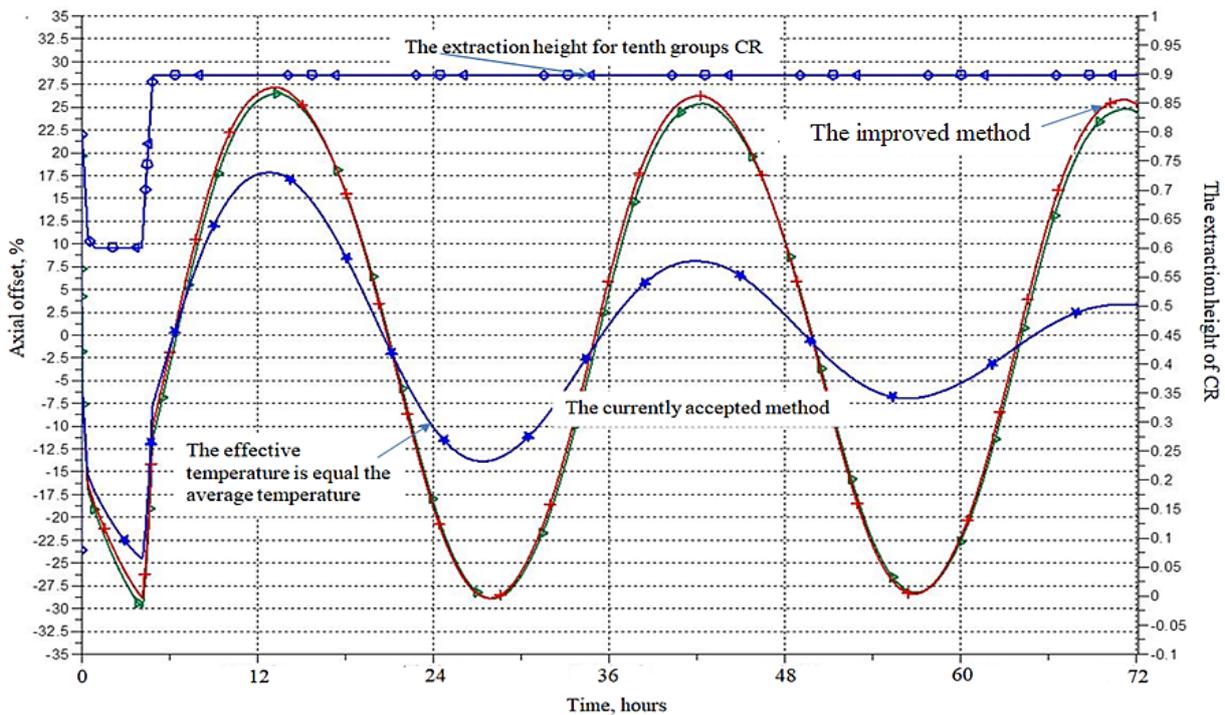


Figure 4 – Axial offset as a function of time at the end of 9th fuel cycle for 3rd unit of Kalinin NPP at 100% power

Table 1 shows the main parameters of xenon oscillations at 75 % of nominal power during commissioning tests for the 3rd unit of Rostov NPP.

Table 1 – the parameters of xenon oscillations at 75% of nominal power at the beginning of the initial core for 3rd unit of Rostov NPP

Oscillation Parameters	Calculation method				
	The effective temperature is equal the average temperature	The currently accepted method	The improved method	Experiment	Program (IR)
The period of Oscillations [hr]	31.08	30.61	30.34±Δ1	30.2	30.50
Stability Index [1/hr]	-0.052	-0.044	-0.0401±Δ2	-0.040	-0.030
Equilibrium offset [percent]	-4.20	-4.25	-3.98	-4.81	-5.60

Program (IR) – staff program of support for NPP operation with WWER-1000(1200).

Where,  $\Delta 1=0.21$  hr,  $\Delta 2=0.0012$  1 / hr- standard deviation from verification data of software complex PROSTOR. The stability index is the main indicator of the reactor stability with respect to Xenon oscillations.

Three methods of Doppler Effect modeling were considered to obtain different values of stability index: I1, I2, I3. The improved method gives the value of I3. Standard deviation  $\Delta 2$  calculated from the experimental data, is established from verification data of software complex PROSTOR. If the difference between the values obtained of the three methods is significantly greater than the value of  $3\Delta 2$ , it can be argued about the advantage of the chosen method of calculation:

If  $|I3-I2| \gg 3\Delta 2$ ,  $|I3-I1| \gg 3\Delta 2$ , then I 3 is preferable.

Table 2 shows the difference between the values of  $K_{eff}$  for the end of 9th fuel cycle for 3<sup>rd</sup> unit of Kalinin NPP at 100% nominal power by using different methods for calculating the effective temperature. The same table shows the critical concentration of boric acid that was obtained for the same state of the reactor core by using different methods for calculating the effective fuel temperature.

Table 2 – Kalinin NPP core parameters at the end of 9th fuel cycle for 3rd unit of Kalinin NPP at 100% of nominal power

Parameters of the reactor core	Calculation method		
	The effective temperature is equal the average temperature	The currently accepted method	The improved method
$\Delta K_{eff}$ , %	0	0.16	0.23
The critical concentration of boric acid, g / Kg	7.98	8.12	8.19
The average effective fuel temperature, $c^0$	790	745	720

## Conclusions

The most important result of the research is that method of accounting the influence of the temperature distribution in the fuel WWER reactors on the resonance capture of neutrons was constructed, which is different from the currently accepted methods in that it takes into account the fuel lattice parameters and the distribution of thermal parameters along the volume of the reactor core. This method does not require special configuration of the model when switching from one type of fuel element to the other and it takes into account effect of Doppler broadening on reactivity coefficients in the presence of fuel temperature profile in the emergency situations related to dehydration of the reactor core.

These results showed that a more accurate temperature distribution calculated in fuel significantly reduces the stabilization of Doppler Effect. This fact becomes particularly important in the implementation of the daily power control during load following modes. This is implemented in new NPPs generation.

The improved method for calculating  $^{238}\text{UO}_2$  resonance absorption with a Nonuniform temperature profile is implemented into the computer-software of the full-scale simulator of Rostov NPP 3<sup>rd</sup> Power unit and the full-scale simulator of the 4<sup>th</sup> Power unit of the Kalinin NPP. The method was tested during acceptance tests of these full-scale simulators.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Выговский, С.Б.* Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для минимизации водообмена в 1-ом контуре при реализации суточных маневренных режимов АЭС / С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави, А.Г. Хачатрян, Ш.А. Абрамян. – Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 3(28). – С. 43-57.
2. *Выговский, С.Б.* Исследование алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для реализации суточных маневренных режимов на АЭС / С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави, А.Г. Хачатрян // Известия вузов. Сер.: Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 67-79.
3. *Вейнберг, А.* Физическая теория ядерных реакторов / А. Вейнберг, Е. Вигнер. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1961. – 724 с.
4. *Артемов, В.Г.* Исследование влияния выгорания топлива на теплофизические свойства твэла в совместных нейтронно-физически теплогидравлических моделях / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, Ю.П. Шемаев. – Сосновый Бор : ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова, 2007. – 10 с.
5. *Бать, Г.А.* Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов / Г.А. Бать. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 510 с.
6. *Kudrov A., Kuzmin Y., Rakov Y.* Effective fuel temperature of WWER-1000. MATEC Web of Conferences, Tomsk, 2017. 4 p.
7. *Семенов, А.А.* Опыт использования программного комплекса «ПРОСТОР» и перспективы его дальнейшего применения / А.А. Семенов, С.Б. Выговский, В.А. Чернаков, Н.В. Щукин // Материалы научной сессии НИЯУ МИФИ – 2004. – Москва, 2004. – С. 79-80.
8. *Выговский, С.Б.* Приложение к аттестационному паспорту № 182 от 28.10.2004 г. Программный комплекс ПРОСТОР (версия 1) / С.Б. Выговский, В.Г. Зимин, Е.В. Чернов. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2004. – 8 с.
9. *Дреснер, Л.* Резонансное поглощение в ядерных реакторах / Л. Дреснер. – Москва : Госатомиздат, 1962. – 136 с.
10. *Rashdan Talal Al Malkawi, Sergey B. Vygovsky, Osama Wasef Batayneh.* Investigation of the impact of steady-state WWER-1000 (1200) core characteristics on the reactor stability with respect to xenon oscillations. Nuclear Energy and Technology, no. 4, 2020, p. 289.
11. *Аверьянова, С.П.* Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200 / С.П. Аверьянова, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107, № 6. – С. 348-351.
12. *Аверьянова, С.П.* Исследование ксеноновых переходных процессов в ВВЭР-1000 на Тяньваньской АЭС (Китай) / С.П. Аверьянова, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, № 4. – С. 183-190.
13. *Хитчкок, А.* Устойчивость ядерных реакторов / А. Хитчкок ; пер. с англ. – Москва : Госатомиздат, 1963. – 68 с.

## REFERENCES

- [1] Vygovsky S.B., Al Malkawi R.T., Khachatryan A. G., Abrahamyan S. A. Optimizaciya algoritmov upravleniya YAEU s WWER-1200 dlya minimizacii vodoobmena v 1-om konture pri realizacii sutochnyh manevrennyh rezhimov [Optimization of Control Algorithms of Nuclear Power Plants with WWER-1200 to Minimize Water Exchange in the 1st Circuit during the Implementation of Daily Maneuvering Modes], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2018, no. 3(28), pp. 43-57 (in Russian).
- [2] Vygovskiy S.B., Al Malkawi R.T., Khachatryan A.G. Issledovanie algoritmov upravleniya YAEU s WWER-1200 dlya realizacii sutochnyh manevrennyh rezhimov na AES [Research of WWER-1200 Reactor Core Control Algorithms for Implementation of Flexible (Load Tracing) Operating Modes]. Izvestiya vuzov. Yaderna Energitka [News of Higher Education Institutions. Series: Nuclear Power Engineering], 2019, № 2, pp. 67-79 (in Russian).
- [3] A. Weinberg, J. Wegner, Fizicheskaya teoriya yadernyh reaktorov [Physical Theory of Nuclear Reactors]. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1961, 724 p. (in Russian).
- [4] Artemov V.G., Artemova L.M., SHemaev Yu.P. Issledovanie vliyaniya vygoraniya topliva na teplofizicheskie svoystva tvéla v sovmestnyh nejtronno-fizicheskii teplogidravlicheskih modelyah [The Influence of Dependence of Burn-Up for Thermophysical Properties of a Fuel Element in Thermal-hydraulic and Neutron-Physical Models]. Sosnovy Bor: FGUP NITI im. A.P. Aleksandrova [Sosnovy Bor: A.P. Alexandrov NITI Federal State Unitary Enterprise], 2007, 10 p. (in Russian).

- [5] Bat G.A. Osnovy teorii i metody rascheta yadernyh energeticheskikh reaktorov [Fundamentals of Theory and Calculation Methods in Nuclear Power Reactors]. Moscow: Energoatomisdat Publ., 1982, 510 p. (in Russian).
- [6] Kudrov A., Kuzmin Y., Rakov Y. Effective Fuel Temperature of WWER-1000. MATEC Web of Conferences, Tomsk, 2017, 4 p. (in English).
- [7] Semenov A.A., Vygovsky S.B., Chernakov V.A., Shchukin N.V. Opyt ispol'zovaniya programmno kompleksa «PROSTOR» i perspektivy ego dal'nejshego primeneniya [Experience in Using the Software Complex «PROSTOR» and the Prospects of its Further Application], Materialy nauchnoj sessii NIYAU MIFI [Proceedings of MEPhI scientific session]. Moscow, 2004, pp. 7980 (in Russian).
- [8] Vygovsky S.B., Zimin V.G., Chernov Ye.V., Korikovskiy K.P., Krayushkin Yu.A., Mischerin S.A., Osadchy M.A., Semyonov A.A., Strashnykh V.P., Chernov E.V., Chernakov V.A. Prilozhenie k attestacionnomu pasportu № 182 ot 28.10.2004 g. Programmyj kompleks PROSTOR (versiya 1) [PROSTOR Software Complex (Ver. 1). The Appendix to the Certification Passport No. 182], October 28, 2004, 8 p. (in Russian).
- [9] Dresner L. Rezonansnoe pogloshchenie v yadernyh reaktorah [Resonance Absorption in Nuclear Reactors]. Moscow: Gosatomizdat, 1962, pp. 136 (in Russian).
- [10] Rashdan Talal Al Malkawi, Sergey B. Vygovsky, Osama Wasef Batayneh. Investigation of the Impact of Steady-State WWER-1000 (1200) Core Characteristics on the Reactor Stability with Respect to Xenon Oscillations. Nuclear Energy and Technology, no. 4, 2020, p. 289 (in English).
- [11] Averyanova S.P., Filimonov P.E. Ksenonovaya ustojchivost' WWER-1200 [Xenon Stability of WWER-1200], Atomnaya Energiya [Atomic Energy], 2009, vol. 107, no. 6, pp. 348-351 (in Russian).
- [12] Averyanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M. () Issledovanie ksenonovykh perekhodnykh processov v WWER-1000 na Tyan'van'skoj AES (Kitaj) [Study of Xenon Transients in WWER-1000 at Tianwan NPP (China)], Atomnaya Energiya [Atomic Energy], 2008, vol. 105, no. 4, pp. 183-190 (in Russian).
- [13] Hitchcock A. Ustojchivost' yadernyh reaktorov [Stability of Nuclear Reactors]. Moscow: Gosatomizdat Publ., 1963, 68 p. (in Russian).

## Influence of Fuel Temperature Distribution Dependence on Neutron-Physical Characteristics of Nuclear Core with WWER-1000 (1200)

**Rashdan T. Al Malkawi<sup>1</sup>, Laith J. Zaidan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Jordan Research and Training Reactor (JRTR), Irbid, Jordan

<sup>2</sup>Texas A&M University *Техасский университет A&M, College Station, Texas*

<sup>1</sup>rashdanmalkawi@gmail.com; ORCID iD: 0000-0003-4458-7264; *WasResearcher ID: P-5338-2018*

<sup>2</sup>L.zaidan@tamu.edu; ORCID iD 0000-0001-8355-7207; *WasResearcher ID: HCH-0363-2022*

*Received by the editorial office on 07/20/2022*

*After revision on 10/03/2022*

*Accepted for publication on 10/12/2022*

*Abstract.* This paper presents the results of the influence of reactivity on fuel temperature distribution for the neutron-physical characteristics of WWER 1000-1200 cores, which in turn affects the parameters of Xenon oscillation. The improved method for calculating Resonance Absorption in a <sup>238</sup>UO<sub>2</sub> (Doppler reactivity effect) with a Nonuniform Temperature Profile are developed. The parameters calculation results for Xenon oscillations have been calculated using complex program PROSTOR. The validation of the improved method was examined by comparing the calculated xenon parameters to measurement results obtained during commissioning tests of WWER-1000 reactor power units. Results showed a more accurate calculation for the Resonance Absorption in a <sup>238</sup>UO<sub>2</sub>, they significantly reduce the stabilization of Doppler Effect broadening, hence these facts, are vital importance in the case of load following mode accompanied by Xenon processes in the core. The improved method is implemented into the computer-software of the Full-Scale Simulator of the 3<sup>rd</sup> Power Unit of the Rostov NPP and the Full-Scale Simulator of the 4<sup>th</sup> Power Unit of the Kalinin NPP. The method was tested during acceptance tests of these Full-Scale Simulators.

*Keywords:* WWER-1000, Xenon oscillations, reactivity, Doppler Effect, fuel temperature distribution.

*For citation:* Al Malkawi R.T., Zaidan L.J. Influence of Fuel Temperature Distribution Dependence on Neutron-Physical Characteristics of Nuclear Core with WWER-1000 (1200) // Global Nuclear Safety. – 2022. – № 4(45). – P. 69-78. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-07>

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И  
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**  
SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS  
DEVELOPMENT OF PLACEMENT TERRITORIES  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.039.58 (476)  
DOI 10.26583/gns-2022-04-08  
EDN IRGGHR

**ОРГАНИЗАЦИЯ ОБУЧЕНИЯ ПО КУЛЬТУРЕ БЕЗОПАСНОСТИ  
В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**

© 2022 Корбут Тамара Николаевна<sup>1</sup>, Кузьмин Андрей Владимирович<sup>2</sup>,  
Науцик Ольга Александровна<sup>3</sup>, Кузьмук Дарья Алексеевна<sup>4</sup>

Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>1</sup>korbut@sosny.bas-net.by, <https://orcid.org/0000-0003-1189-2465>

<sup>2</sup>avkuzmin@sosny.bas-net.by

<sup>3</sup>o.nautsyk@sosny.bas-net.by

<sup>4</sup>kuzmuk@sosny.bas-net.by

*Аннотация.* Обучение и подготовка руководящих работников и специалистов по вопросам культуры безопасности является одним из наиболее важных инструментов внедрения и совершенствования культуры безопасности на объектах использования атомной энергии. В данной статье авторами рассмотрен вопрос обучения культуре безопасности в Республике Беларусь. Проведен анализ области применения понятия «культура безопасности» в нормативной документации Республики Беларусь и МАГАТЭ. Приведены требования действующей нормативно-правовой базы Республики Беларусь в отношении формирования культуры безопасности у работников, осуществляющих деятельность в области использования атомной энергии, а также международные нормы и рекомендации МАГАТЭ по поддержанию и повышению уровня культуры безопасности. Рассмотрены два направления обучения культуре безопасности в Республике Беларусь: обучение в рамках магистерской программы при подготовке молодых специалистов и в рамках курсов повышения квалификации работников объектов использования атомной энергии, а также краткое содержание данных программ.

*Ключевые слова:* культура безопасности, безопасность, обучение, подготовка, объект использования атомной энергии, эксплуатирующая организация.

*Для цитирования:* Корбут Т.Н., Кузьмин А.В., Науцик О.В., Кузьмук Д.А. Организация обучения по культуре безопасности в Республике Беларусь // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 79-86. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-08>

Поступила в редакцию 19.09.2022

После доработки 11.11.2022

Принята к печати 21.11.2022

## **Введение**

Обеспечение культуры безопасности относится к фундаментальным принципам безопасности, ведь эффективность всей системы ядерной безопасности во многом зависит от мотивации, профессионализма и мировоззрения персонала. Несмотря на важность технических средств обеспечения безопасности ядерных материалов, их

эффективность в конечном счете зависит от персонала эксплуатирующих организаций, от его желания и мотивации выполнять свою работу. Даже оптимально спроектированная система не будет работать, если не соблюдаются необходимые для ее функционирования нормы и правила, если работники, отвечающие за безопасность, не следуют инструкциям или не докладывают о нарушениях в работе системы.

Республика Беларусь приближается к полному вводу в эксплуатацию своей первой АЭС. В 2021 г. был введен в промышленную эксплуатацию первый энергоблок. Второй блок находится на стадии ввода в эксплуатацию. Приоритетные стратегические цели правительства на ближайшие годы заключаются в том, чтобы обеспечить наличие у регулирующих органов (Министерства по чрезвычайным ситуациям и Министерства здравоохранения) и их организаций технической поддержки хорошо подготовленных, высококвалифицированных, аттестованных сотрудников, придерживающихся принципов культуры безопасности и физической безопасности и способных решать проблемы, которые могут возникать на всех стадиях жизненного цикла АЭС, и при работе с ИИИ.

### Нормативная база

Правовое регулирование деятельности в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности в Республике Беларусь (рис. 1) осуществляется на основе международных практик и с учетом рекомендаций МАГАТЭ. Требования к культуре безопасности, обозначенные в национальных нормативных правовых актах (НПА), отражены в локальных нормативных правовых актах объектов использования атомной энергии [1].

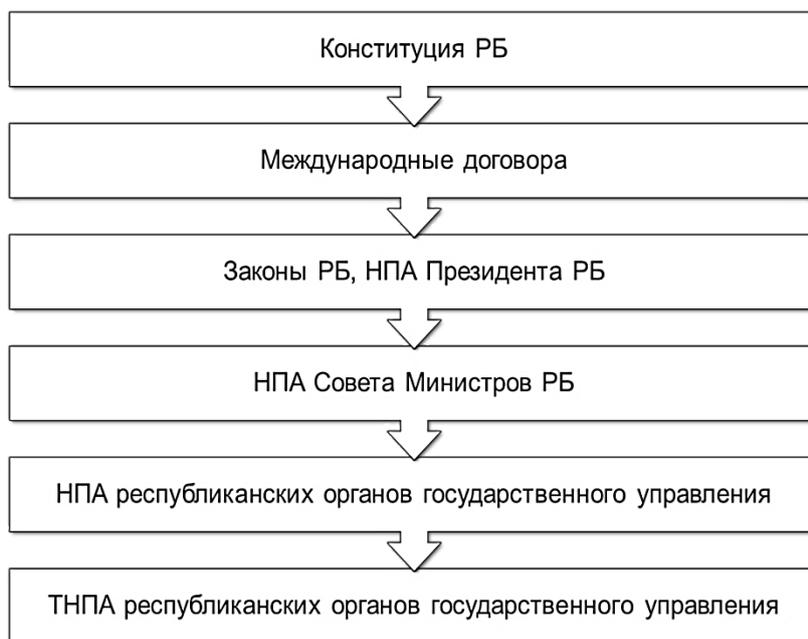


Рисунок 1 – Система нормативно-правового регулирования ядерной и радиационной безопасности в Республике Беларусь [Nuclear and radiation safety legal regulatory system of the Republic of Belarus]

### Международная и национальная правовые базы

Понятие культуры безопасности (nuclear safety culture) было впервые озвучено в «Итоговом докладе Международной консультативной группы по ядерной безопасности (МКГЯБ) о совещании по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле», опубликованном в Серии изданий по безопасности, № 75-INSAG-1 (1986 г.). В одном из последующих докладов (№ 75-INSAG-4), который был полностью посвящен культуре безопасности, было дано её определение: «Культура безопасности – это такой

набор характеристик и особенностей деятельности организаций и поведения отдельных лиц, который устанавливает, что проблемам безопасности атомной станции, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, определяемое их значимостью» [2].

Культуре безопасности посвящено множество документов МАГАТЭ, в том числе в серии докладов МКГЯБ [2, 3], в серии норм по безопасности [4-6], в серии докладов по безопасности [7] и др. В данных документах отражены основные принципы культуры безопасности, ключевые аспекты её совершенствования, а также то, как она должна быть отражена в системе управления организаций.

Помимо правовой базы по вопросам культуры безопасности существует ряд документов МАГАТЭ, посвященных культуре физической ядерной безопасности (nuclear security culture), определение которой, согласно [8], звучит следующим образом: «Культура физической ядерной безопасности – это совокупность характеристик, отношения к делу и поведения людей, организаций и учреждений, посредством которой обеспечивается поддержание и повышение уровня физической ядерной безопасности». Данное понятие было введено в оборот по аналогии с понятием культуры безопасности, когда, в связи с возрастающей террористической угрозой, «пассивное» отношение к физической защите оказалось недостаточным для защиты ядерных объектов [9]. Культура физической ядерной безопасности отражена в документах серии по физической ядерной безопасности, в частности № 7, 28 и 38 [8, 10, 11]. Таким образом, с точки зрения МАГАТЭ, культура безопасности и культура физической ядерной безопасности рассматриваются отдельно, хотя они и должны внедряться и совершенствоваться одновременно, чтобы избежать противоречий между требованиями ограничения доступа физической защиты и принципами открытости и доверия культуры безопасности.

В нормативной документации Республики Беларусь на настоящий момент введено только одно понятие – культура безопасности, и при этом оно имеет не одно определение. Так, в Постановлении Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.03.2010 № 39 «Об утверждении Санитарных норм, правил и гигиенических нормативов «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций» [12] культура безопасности определена как «комплекс характеристик и особенностей деятельности организаций и поведения отдельных лиц, который устанавливает, что проблемам защиты и безопасности, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, соответствующее их значимости».

В то же время, согласно Постановлению Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 19.10.2020 г. № 42 «Об утверждении норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности», культура безопасности – это «совокупность характеристик и особенностей деятельности организаций и поведения всех лиц, вовлеченных в выполнение работ (оказание услуг), влияющих на безопасность ИИИ, которая определяет, что проблемам безопасности ИИИ, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, соответствующее их значимости» [13].

Третий вариант определения можно найти в Постановлении Совета Министров Республики Беларусь от 14.06.2019 № 385 «О физической защите объектов использования атомной энергии», где говорится, что культура безопасности – представляет собой «совокупность характеристик, особенностей деятельности организаций и поведения отдельных лиц, посредством которой обеспечивается устойчивое сохранение и повышение ядерной радиационной безопасности, в том числе физическая защита» [14].

Исходя из вышеуказанных определений, можно сделать вывод, что в Республике

Беларусь для объектов использования атомной энергии под понятием культуры безопасности имеется в виду как культура безопасности, так и культура физической ядерной безопасности МАГАТЭ. Следовательно, программы обучения специалистов, работающих в области атомной энергетики или на других ядерно- и/или радиационноопасных объектах, должны включать в себя тему культуры физической ядерной безопасности в той или иной мере в зависимости от степени вовлечения данных специалистов в обеспечение физической защиты.

### **Подходы к организации обучения культуре безопасности**

В настоящее время с развитием атомной энергетики, законодательство предъявляет требования, согласно которым формирование культуры безопасности должно включаться в подготовку персонала АЭС [15], персонала исследовательских ядерных установок, подкритических и надкритических стендов [16], а также персонала, осуществляющего обращение с источниками ионизирующего излучения [13]. Чтобы выполнить данные требования законодательства, необходимо создать программы обучения культуре безопасности. На данный момент культура безопасности в Республике Беларусь изучается в рамках следующих программ:

- Магистерская программа подготовки специалистов по ядерной и радиационной безопасности Белорусского государственного университета;
- Образовательные программы повышения квалификации руководящих работников и специалистов, осуществляющих деятельность в области использования атомной энергии, по вопросам ядерной и (или) радиационной безопасности.

### **Магистерская программа**

Первое направление организации обучения реализовано на базе химического факультета Белорусского государственного университета и ставит целью обучение и подготовку кадров в области ядерной и радиационной безопасности в Республике Беларусь путем разработки и внедрения образовательных программ второй ступени высшего образования. Специальность 1-100 80 01 «Ядерная и радиационная безопасность» была создана ввиду возросшей потребности в специалистах для работы на действующей атомной электростанции и в профильных организациях. [17]

Программа носит сетевой характер, и, помимо Белорусского государственного университета, в обучении специалистов принимают участие Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Полоцкий государственный университет, Полесский государственный университет, Государственный университет имени Франциска Скорины, Государственный университет Янки Купалы в Гродно.

Магистерская программа ставит задачей подготовить профессионалов, способных применять полученные научные знания в области здравоохранения, энергоснабжения, исследований и защиты окружающей среды. Фактически, выпускники магистратуры смогут:

- знать основные нормы и правила ядерной и радиационной безопасности и контролировать их соблюдение;
- работать с приборами дозиметрии и производить мониторинг окружающей среды;
- собирать и анализировать данные для проектирования устройств регистрации ионизирующего излучения, электронных и информационно-управляющих систем;
- разбираться в необходимой для работы документации МАГАТЭ;
- генерировать и реализовывать инновационные идеи, использовать современные информационные технологии, общаться в междисциплинарной и международной научной среде благодаря двуязычным (английский и русский) учебным материалам.

### **Обучение персонала**

Обучение персонала ОИАЭ по вопросам культуры безопасности производится в рамках образовательных программ повышения квалификации руководящих работников и специалистов организаций, осуществляющих деятельность в области использования атомной энергии, по вопросам ядерной и радиационной безопасности. Разрешение на реализацию данных образовательных программ в Республике Беларусь имеют два высших учебных заведения – Университет гражданской защиты МЧС и Республиканский институт высшей школы. Данные образовательные программы включают разделы по культуре безопасности, которые разрабатываются сотрудниками научного учреждения «ОИЭЯИ – Сосны», имеющими большой опыт работы в области безопасности ядерно- и радиационноопасных объектов. До ввода в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси являлось единственной эксплуатирующей организацией в Республике Беларусь, где в рамках международного сотрудничества в течение долгого времени в учреждении организовывалось уникальное для страны обучение темам, связанным с обеспечением безопасности на объектах использования атомной энергии.

Целевой аудиторией образовательных программ повышения квалификации руководящих работников и специалистов по вопросам ядерной и (или) радиационной безопасности являются как персонал объектов использования атомной энергии, так и другие работники, вовлеченные в обеспечение ядерной и радиационной безопасности и физической защиты. Целью курса является повышение осведомленности работников в вопросах культуры безопасности, а также развитие мотивации, ответственности и заинтересованности работников по отношению к обеспечению безопасности объектов использования атомной энергии. Программа данных курсов разрабатывается с учетом требований и рекомендаций, отраженных в документах МАГАТЭ, и национальных правовых актах, а также регулярно обновляется в соответствии с изменением законодательства и новыми разработками в области культуры безопасности.

В программу включены как материалы по культуре безопасности (nuclear safety culture), так и элементы культуры физической ядерной безопасности (nuclear security culture), которая, согласно нормативной документации Республики Беларусь, тоже включена в понятие культуры безопасности. Такой подход позволяет формировать у работников осознанное отношение к безопасности объекта, как с точки зрения безаварийности, так и с точки зрения угрозы злоумышленных действий.

Программа обучения содержит следующие основные разделы:

- понятие культуры безопасности: как оно появилось, его современное определение и применение в атомной отрасли и других областях;
- основные принципы культуры безопасности и их отражение в интегрированной системе управления;
- человеческий фактор и его влияние на безопасность ядерных объектов: почему нельзя избавиться от влияния человеческого фактора, как минимизировать число и последствия человеческих ошибок, и каким образом с этим связана культура безопасности;
- ключевые аспекты внедрения и совершенствования культуры безопасности;
- внешние и внутренние угрозы безопасности объектов использования атомной энергии;
- понятие чувствительной информации и меры её защиты;
- самооценка культуры безопасности в организациях: методы проведения самооценки и обработка полученных результатов;
- основные документы МАГАТЭ, законы и другие правовые акты Республики

Беларусь, которыми необходимо руководствоваться при формировании и совершенствовании культуры безопасности в организации.

Материалы базового курса, разработанного для проведения обучения специалистов по культуре безопасности, дополняются примерами и случаями из практики, которые подбираются исходя из целевой аудитории занятия. Занятия проводятся в интерактивной форме и направлены на вовлечение обучаемых в дискуссию на разбираемые темы. После проведения занятий обучаемым предлагается ответить на тестовые вопросы для контроля понимания материала.

### Заключение

В данной статье представлен подход к организации обучения культуре безопасности в Республике Беларусь, реализуемый в настоящее время. В сентябре 2022 г. набраны первые слушатели в рамках магистерской программы Белорусского государственного университета. Для руководителей и специалистов, как объектов использования атомной энергии, так и министерств и ведомств Республики Беларусь, вовлеченных в обеспечение ядерной и радиационной безопасности, организовано обучение по культуре безопасности в рамках программ повышения квалификации.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Описание системы нормативно-правового регулирования ядерной и радиационной безопасности.* – URL : <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/zakonodatelstvo/harakteristika-sistemy-normativno-pravovogo-regulirovaniya-yadernoy-i-radiatsionnoy-bezopasnosti/> (дата обращения: 14.09.2022)
2. *Safety culture.* A report by the international nuclear safety advisory group. INSAG series No 4. IAEA, 1991, 31 p.
3. *Key practical issues in strengthening safety culture.* A report by the international nuclear safety advisory group. INSAG series No 15. IAEA, 2015, 25 p.
4. *Leadership and Management for Safety.* General Safety Requirements No GSR Part 2. IAEA, 2016, 26 p.
5. *Applications of the management system for facilities and activities safety guide:* IAEA safety standards series No GS-G-3.1. IAEA, 2006, 123 p.
6. *The management system for nuclear installations.* Safety guide: IAEA safety standards series No GS-G-3.5. IAEA, 2009, 139 p.
7. *Performing safety culture self-assessments.* Safety reports series № 83. IAEA, 2016, 157 p.
8. *Nuclear Security Culture. Implementing Guide.* IAEA Nuclear Security Series No 7. IAEA, 2008, 37 p.
9. *Бычков, В.М.* Размышления на тему культуры гарантий / В.М. Бычков, Д. Карлсон. – URL: [https://www.nti.org/wp-content/uploads/2022/05/Reflections-on-Safeguards-Culture\\_Russian\\_r4.pdf](https://www.nti.org/wp-content/uploads/2022/05/Reflections-on-Safeguards-Culture_Russian_r4.pdf) (дата обращения: 14.09.2022).
10. *Self-assessment of nuclear security culture.* Technical guidance. IAEA nuclear security series No 28. IAEA, 2017, 107 p.
11. *Enhancing nuclear security culture in organizations associated with nuclear and other radioactive material.* Technical guidance. IAEA nuclear security series No 38. IAEA, 2021, 206 p.
12. *Об утверждении Санитарных норм, правил и гигиенических нормативов «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации атомных электростанций».* Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 31.03.2010 № 39. – URL : [https://radbez.bsmu.by/library/san\\_pin\\_NP.pdf](https://radbez.bsmu.by/library/san_pin_NP.pdf) (дата обращения: 14.09.2022).
13. *Об утверждении норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности.* Постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 19.10.2020 г. № 42. – URL : [https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/e75/postmes\\_42\\_20201019.pdf](https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/e75/postmes_42_20201019.pdf) (дата обращения: 14.09.2022).
14. *О физической защите объектов использования атомной энергии.* Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 14.06.2019 № 385. – URL : [https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/62d/sovmin\\_385\\_20190614.pdf](https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/62d/sovmin_385_20190614.pdf) (дата обращения: 14.09.2022).

15. *Об утверждении* норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности. Постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 13.04.2020 г. № 15. – URL : [https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/d06/postmes\\_15\\_20200413\\_red\\_20200730.pdf](https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/d06/postmes_15_20200413_red_20200730.pdf) (дата обращения: 14.09.2022).
16. *Об утверждении* норм и правил по обеспечению ядерной и радиационной безопасности. Постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 30.03.2022 г. № 36. – URL : <https://energodoc.by/document/view?id=4283> (дата обращения: 14.09.2022).
17. Типовые учебные планы II ступени высшего образования (магистратуры) / Электронная библиотека БГУ. Главное управление образовательной деятельности. – URL : <https://elib.bsu.by/handle/123456789/276425> (дата обращения: 04.11.2022).

## REFERENCES

1. Opisanie sistemy normativno-pravovogo regulirovaniya yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti. [Nuclear and Radiation Safety Legal Regulatory System Description]. URL: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/zakonodatelstvo/harakteristika-sistemy-normativno-pravovogo-regulirovaniya-yadernoy-i-radiatsionnoj-bezopasnosti/> (in Russian).
2. Safety Culture. A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group. INSAG series No 4. IAEA, 1991, 31 p. (in English).
3. Key Practical Issues in Strengthening Safety Culture. A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group. INSAG series No 15. IAEA, 2015, 25 p. (in English).
4. Leadership and Management for Safety. General Safety Requirements No GSR Part 2. IAEA, 2016, 26 p. (in English).
5. Applications of the Management System for Facilities and Activities Safety Guide: IAEA Safety Standards Series No GS-G-3.1. IAEA, 2006, 123 p. (in English)
6. The Management System For Nuclear Installations. Safety Guide: IAEA Safety Standards Series No GS-G-3.5. IAEA, 2009, 139 p. (in English).
7. Performing Safety Culture Self-Assessments. Safety Reports Series № 83. IAEA, 2016, 157 p. (in English).
8. Nuclear Security Culture. Implementing Guide. IAEA Nuclear Security Series No 7. IAEA, 2008, 37 p. (in English).
9. Bychkov V.M. Razmyshleniya na temu kul'tury garantij [Reflections on Safeguards Culture]. [https://www.nti.org/wp-content/uploads/2022/05/Reflections-on-Safeguards-Culture\\_Russian\\_r4.pdf](https://www.nti.org/wp-content/uploads/2022/05/Reflections-on-Safeguards-Culture_Russian_r4.pdf) (accessed 14.09.2022) (in Russian).
10. Self-Assessment of Nuclear Security Culture. Technical Guidance. IAEA Nuclear Security Series No 28. IAEA, 2017, 107 p. (in English).
11. Enhancing Nuclear Security Culture in Organizations Associated with Nuclear and other Radioactive Material. Technical Guidance. IAEA Nuclear Security Series No 38. IAEA, 2021, 206 p. (in English).
12. Postanovlenie Ministerstva zdravoohraneniya Respubliki Belarus' ot 31.03.2010 No 39 «Ob utverzhdenii Sanitarnyh norm, pravil i gigienicheskikh normativov «Gigienicheskie trebovaniya k proektirovaniyu i ekspluatatsii atomnyh elektrostancij». [Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus of 31.03.2010. No 39 “Approval of Sanitary Norms, Rules and Hygienic Standards «Hygienic Requirements to Construction and Operation of Nuclear Power Plants»] (accessed 14.09.2022) (in Russian).
13. Postanovlenie Ministerstva po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus' ot 19.10.2020 g. No 42 «Ob utverzhdenii norm i pravil po obespecheniyu yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti» [Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus of 19.10.2020. No 42 “Approval of Norms and Rules of Nuclear and Radiation Safety”] (accessed 14.09.2022) (in Russian).
14. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 14.06.2019 № 385 «O fizicheskoj zashchite ob'ektov ispol'zovaniya atomnoj energii». [Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 19.10.2020. No 42 “Physical Protection of Nuclear Facilities”] (in Russian).
15. Postanovlenie Ministerstva po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus' ot 13.04.2020. No 15 «Ob utverzhdenii norm i pravil po obespecheniyu yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti» [Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus of 13.04.2020. No 15 “Approval of Norms and Rules of Nuclear and Radiation Safety”] (accessed 14.09.2022) (in Russian).
16. Postanovlenie Ministerstva po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus' ot 30.03.2022. No 36 «Ob utverzhdenii norm i pravil po obespecheniyu yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti» [Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus of 30.03.2022. No 36 “Approval of Norms and Rules of Nuclear and Radiation Safety”] (accessed 14.09.2022) (in Russian).

17. Elektronnaya biblioteka BGU. Glavnoe upravlenie obrazovatel'noj deyatelnosti. Tipovye uchebnye plany. Tipovye uchebnye plany II stupeni vysshego obrazovaniya (magistratury) [BSU E-Library. Main Educational Administration. Standard Curriculums. Standart Curriculums of the 2<sup>nd</sup> stage of Higher Education (Magistracy)], <https://elib.bsu.by/handle/123456789/276425> (accessed 04.11.2022) (in Russian).

### **Safety Culture Education and Training in the Republic of Belarus**

**Tamara N. Korbut<sup>1</sup>, Andrei V. Kuzmin<sup>2</sup>, Olga A. Nautsyk<sup>3</sup>, Darya A. Kuzmuk<sup>4</sup>**

*The State Scientific Institution «The Joint Institute for Nuclear and Power Research – Sosny» of the National Academy of Sciences of Belarusst. Academician Krasin st., 99, Minsk, the Republic of Belarus, 220109*

*<sup>1</sup>korbut@sosny.bas-net.by; ORCID iD: 0000-0003-1189-2465; WoS ResearcherID: AAZ-8043-2020*

*<sup>2</sup>avkuzmin@sosny.bas-net.by*

*<sup>3</sup>o.nautsyk@sosny.bas-net.by*

*<sup>4</sup>kuzmuk@sosny.bas-net.by*

*Received by the editorial office on 09/19/2022*

*After revision on 11/11/2022*

*Accepted for publication 11/21/2022*

*Abstract.* Safety culture education and training for managers and specialists is one of the most important tools for safety culture implementation and enhancement at nuclear facilities. In this article, the authors consider the topic of safety culture education in the Republic of Belarus. An analysis of the scope of the concept of «safety culture» application in the regulatory documentation of the Republic of Belarus and the IAEA is carried out. The requirements of the current rules and regulations of the Republic of Belarus regarding the development of safety culture among nuclear facilities employees, as well as international standards and recommendations of the IAEA on maintaining and improving the level of safety culture are given. Two directions of safety culture education in the Republic of Belarus are considered: education within the framework of the master's program preparing young specialists and within the framework of advanced training courses for nuclear facilities employees, as well as a summary of these programs.

*Keywords:* safety culture, safety, education, training, nuclear facility, operating organization.

*For citation:* Korbut T.N., Kuzmin A.V., Nautsyk O.A., Kuzmuk D.A. Safety Culture Education and Training in the Republic of Belarus // Global Nuclear Safety. 2022. Vol. 4(45). P. 79-86. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-08>.

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И  
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**  
SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS  
DEVELOPMENT OF PLACEMENT TERRITORIES  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК [330.101.8 : 331.4] : 621.039  
DOI 10.26583/gns-2022-04-09  
EDN JGVNGL

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ  
КОРПОРАТИВНЫХ СТАНДАРТОВ КУЛЬТУРЫ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ  
АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

© 2022 Лыскова Ирина Ефимовна

*Коми республиканская академия государственной службы и управления, Сыктывкар, Республика Коми,  
Россия*

*IrinaLyskova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2748-2794>*

*Актуальность.* В статье актуализируются методологические основы и практические аспекты управления культурой производственной безопасности промышленных предприятий, включая предприятия атомной промышленности. Подчёркивается значимость корпоративных стандартов культуры производственной безопасности как инструмента управления производственной безопасностью промышленных предприятий. Предлагается общая характеристика нормативной базы, способствующей разработке и внедрению корпоративных стандартов культуры производственной безопасности промышленного производства.

*Ключевые слова:* государственная политика в области стандартизации, производственная безопасность, культура производственной безопасности, управление культурой производственной безопасности, корпоративные стандарты, службы стандартизации.

*Для цитирования:* Лыскова И.Е. Методологические основы разработки и внедрения корпоративных стандартов культуры производственной безопасности предприятий атомной промышленности // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 87-100. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-09>.

Поступила в редакцию 05.09.2022

После доработки 23.11.2022

Принята к печати 29.11.2022

Современные методологические основы разработки и внедрения корпоративных стандартов культуры производственной безопасности могут быть выстроены на основе концепции управления бизнес-процессами. Известными специалистами в этой области являются Дж. Джестон и Й. Нелис. Они предложили следующее комплексное и содержательное определение управления бизнес-процессами: «Достижение целей организации посредством совершенствования, управления и контроля основных бизнес-процессов» [1]. Специалисты подчёркивали значимость единства смыслов и трактовок данного определения. Они конкретизировали сущность терминов, составляющих определение «управления бизнес-процессами» в обозначенной

последовательности. «Достижение» предполагает реализацию стратегических целей, закреплённых в стратегическом плане организации. «Цели» охватывают «широкий диапазон» – от стратегических задач организации до задач конкретного процесса, то есть достижение реальных результатов, решения конкретных производственных задач. Под «организацией» в контексте управления бизнес-процессами понимается предприятие или его структурное подразделение, в котором реализуются бизнес-процессы. «Совершенствование» направлено на повышение эффективности и продуктивности бизнес-процессов. Под «управлением» понимается «измерение показателей эффективности работы людей и процессов, а также управления ими», то есть организация «всех необходимых компонентов процессов», включая структуры, системы, в частности расстановку кадров с учётом их квалификации, мотивации, эффективности работы и др. «Контроль» характеризуется как «сквозное от начала до конца управление бизнес-процессами и включает полный цикл Деминга («план – выполнение – проверка – реакция (действие)» (*Plan – Do – Check – Act*). Неотъемлемым компонентом контроля является необходимость правильного (объективного) измерения. Бизнес-процессы в организации могут быть разделены на три категории: управленческие, производственные (основные), обеспечивающие. Под «основными бизнес-процессами», Дж. Джестон и Й. Нелис имели в виду «настоящие процессы, которые включают всё, что необходимо человеку, заинтересованному в результате, для получения ожидаемого результата», то есть конечных продуктов или услуг, предназначенных для заинтересованного лица или другого внутреннего процесса. Управление основными бизнес-процессами обеспечивает выгоды и преимущества бизнесу, содействует достижению его стратегических целей [1, с. 46-48].

Целью исследования является систематизация методологических основ разработки и внедрения корпоративных стандартов культуры производственной безопасности промышленных предприятий, в том числе атомной промышленности, как инструмента формирования и совершенствования интегрированной системы менеджмента безопасности промышленного производства [2-6].

Задачи исследования:

- обоснование концептуальных основ формирования и совершенствования культуры производственной безопасности промышленного производства, предприятий атомной промышленности в частности;
- характеристика ключевых тенденций государственной политики Российской Федерации в области стандартизации;
- выявление роли службы стандартизации в процессе разработки и внедрения корпоративных стандартов промышленных предприятий;
- актуализация аспектов культуры производственной безопасности в системе корпоративных стандартов применительно к различным отраслям промышленного производства, включая атомную промышленность.

Объектом исследования является процесс управления культурой производственной безопасности промышленных предприятий, предметом – теоретическое и нормативно-правовое обоснование организации процесса разработки и внедрения корпоративных стандартов культуры производственной безопасности предприятий атомной промышленности.

Основным методом исследования является структурно-функциональный анализ, позволяющий на основе системного и процессного подходов раскрыть структурные и содержательные аспекты процесса разработки и внедрения корпоративных стандартов промышленных предприятий.

Среди предшественников методологии управления бизнес-процессами следует отметить ряд концепций, связанных с целями повышения качества, производительности и эффективности производства. В 1980-е годы значительное внимание привлекали идеи всеобщего управления качеством (TQM – Total Quality

Management). В 1990-е годы получила известность концепция реинжиниринга бизнес-процессов (BPR – Business Process Reengineering). Во второй половине 1990-х годов особую популярность приобрела концепция планирования ресурсов предприятия (ERP – Enterprise Resource Planning). В конце 1990-х годов и начале нового тысячелетия приобрели значимость аспекты управления клиентоориентированностью предприятий (CRM – Customer Relation Management). Кроме того, в последние десятилетия широкое признание получили концепция бережливого производства, концепция «шести сигм», методология проектного менеджмента, изложенная в «Руководстве к своду знаний по управлению проектами» (Guide to Project Management Body of Knowledge, PMBOK), Agile-менеджмент, объединяющий широкую совокупность гибких методологий эффективного управления организацией.

Комплексность методологии управления бизнес-процессами для организации может быть обоснована широкой совокупностью факторов, связанных со спецификой организации, бизнес-процессов, продукции и услуг; сложившейся системой управления; особенностями персонала, клиентов и др.

Ключевыми аспектами (элементами) концепции управления бизнес-процессами являются следующие:

- а) процесс, неразрывно связанный с генеральной стратегией организации;
- б) люди/персонал, как ключевой фактор обеспечивающий качество, производительность и эффективность управления бизнес-процессами организации;
- в) технологии, характеризующиеся совокупностью методов и инструментов, обеспечивающих эффективность бизнес-процессов;
- г) управление проектами, как платформа, объединяющая три вышеперечисленных базовых аспекта (элементов основания), обеспечивающих реализацию управленческих, производственных, обеспечивающих процессов.

Общая схема внедрения концепции управления бизнес-процессами включает стратегию организации, архитектуру процессов, стартовую площадку, понимание, инновации, разработку, персонал, реализацию/внедрение, реализацию ценностей, устойчивое функционирование [1, с. 105-110]. Опираясь на данную схему при общей характеристике процесса формирования и совершенствования культуры производственной безопасности предприятий атомной промышленности расставим следующие акценты:

1. Неотъемлемой составляющей генеральной стратегии организации является стратегия безопасности промышленного производства. Культура безопасности трактуется как значимый компонент реализации стратегии безопасности промышленного предприятия.

2. Архитектура (модель, структура) процесса формирования и совершенствования культуры производственной безопасности промышленных предприятий предусматривает воплощение базовых компонентов, включая культуру промышленной безопасности, культуру качества, экологическую культуру, культуру безопасности труда и охраны здоровья.

3. Стартовой площадкой для реализации проектов развития культуры производственной безопасности может стать структурное подразделение, ответственное за аспекты производственной безопасности промышленного предприятия, кадровая служба и др.

4. Понимание обосновывается актуальностью и обязательностью норм, требований, правил, регламентов, стандартов безопасности в аспекте экономической, социальной, экологической безопасности промышленного производства.

5. Инновации объединяют усилия всех заинтересованных сторон внутренней и внешней среды организации в сфере совершенствования системы безопасности промышленного производства.

6. Разработка процесса формирования и совершенствования культуры производственной безопасности осуществляется на индивидуальном, групповом уровне, а также на уровне высшего руководства, и основана на вовлечённости всех участников производственной деятельности в процессы безопасности.

7. Персонал – непосредственный участник всех процессов, направленных на реализацию стратегии безопасности промышленного производства и позитивную динамику в области обеспечения производственной безопасности.

8. Реализация/внедрение предусматривает воплощение целей, задач, направлений, программ, мероприятий в области развития и повышения результативности культуры производственной безопасности.

9. Реализация ценности обеспечивается осознанием и воплощением безопасности как цели, ценности, нормы, стандарта качества промышленного производства.

10. Устойчивое функционирование в области культуры производственной безопасности определяется приверженностью руководства целям безопасности, обеспечением мониторинга, эффективного управления и непрерывного совершенствования бизнес-процессов в сфере безопасности промышленного производства.

Наряду с систематическим мониторингом, оценкой результативности, управлением изменениями, развитием технологий непрерывное совершенствование предусматривает стандартизацию бизнес-процессов. Процесс формирования и совершенствования культуры производственной безопасности также подлежит стандартизации. По причине слабой освещённости вопросов стандартизации культуры производственной безопасности промышленных предприятий атомной отрасли в научной литературе основными источниками для исследования послужили нормативно-правовые документы Российской Федерации по вопросам национальной, экономической, промышленной безопасности, а также широкая совокупность международных, межгосударственных и национальных стандартов, касающихся вопросов безопасности.

Процесс разработки и внедрения корпоративных стандартов культуры производственной безопасности промышленных предприятий определяется аспектами международной, региональной и национальной стандартизации, обеспечивающимися международными, региональными и национальными организациями по стандартизации, в состав которых входит и Российская Федерация. По инициативе этих организаций разрабатывается и внедряется множество международных, региональных и национальных документов по стандартизации. Международными организациями в области стандартизации являются ИСО – Международная организация по стандартизации (ISO, International Organization for Standardization), МЭК – Международная электротехническая комиссия (IEC, International Electrotechnical Commission), МСЭ – Международный союз электросвязи (ITU, International Telecommunication Union), Международный Совет по нормам и правилам (ICG, International Code Council) и др.

Международная организация по стандартизации, созданная в 1946 г., – наиболее авторитетная из специализированных организаций. Стандарты ИСО направлены на обеспечение единства требований к качеству процессов, систем, продукции. Стандартами ИСО руководствуются различные организации, промышленные предприятия в частности, с целью достижения соответствия систем, процессов, продукции предъявляемым критериям и требованиям, что способствует упорядоченности в области оценки соответствия на международном уровне.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) основана в 1906 г. и является одной из старейших международных организаций в области стандартизации физических характеристик электротехнического и электронного оборудования, средств

связи, ядерного приборостроения, судостроения и морской навигации, авиационного и космического приборостроения, лазерной техники, медицинской техники, атомной энергии, информатики, акустики и др. Значительное внимание уделяется разработке стандартов в области безопасности, надёжности и электромагнитной совместимости используемого оборудования, его безопасности для человека и окружающей среды. Подобно ИСО, в МЭК функционируют национальные комитеты (организации) стандартизации технологий в соответствующих отраслях и представляющих национальные интересы в этой международной организации. Российская Федерация является членом МЭК с 1911 г. и руководит деятельностью технических комитетов – «Ядерное приборостроение» и «Преобразователи для высоковольтных линий передач постоянного тока». Кроме того, российские специалисты принимают участие в работе технических комитетов «Электронные кабели», «Электрические установки судов, подвижных и стационарных морских конструкций», «Электрические кабели», «Системы измерения и управления в промышленном процессе».

Международный союз электросвязи (МСЭ) – это международная межправительственная организация, основанная в 1865 г. Сегодня МСЭ специализируется в области стандартизации электросвязи. Она объединяет более 500 организаций, курирующих телефонные, телекоммуникационные, почтовые министерства и ведомства, и координирующих функционирование оборудования для обеспечения телекоммуникационного сервиса. Ключевая задача МСЭ состоит в разработке и внедрении на международном уровне правил и рекомендаций для построения и использования глобальных телесетей и их сервисов.

Международный Совет по нормам и правилам основан в 1994 г. с целью развития единой комплексной и согласованной модели национальных стандартов в области строительства. Основная деятельность Международного совета по нормам и правилам направлена на обеспечение безопасности сооружений, разработку мер противопожарной безопасности зданий и сооружений, развитие стандартов в области строительства жилых и промышленных зданий, сооружений социальной инфраструктуры.

Кроме того, функционирует ряд региональных и национальных организаций по стандартизации. Региональная организация по стандартизации формируется на основе географического, политического или экономического региона мира. В качестве примера региональных организаций по стандартизации можно привести СЕН – Европейский комитет по стандартизации (CEN, European Committee for Standardization); СЕНЭЛЕК – Европейский комитет электротехнической стандартизации (CENELEC, European Committee for Electrotechnical Standardization); Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации (ЕАСС), членами которой являются национальные органы по стандартизации стран, входящих в Содружество Независимых государств [7].

Национальной организацией по стандартизации в Российской Федерации является Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Это федеральный орган исполнительной власти, который осуществляет функции по оказанию государственных услуг, управлению государственным имуществом в сфере технического регулирования, стандартизации и обеспечения единства измерений.

Основными задачами Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии являются обеспечение единства измерений; осуществление государственного контроля (надзора) за соблюдением требований технических регламентов и обязательных требований стандартов; создание и ведение федерального информационного фонда технических регламентов и стандартов и единой информационной системы по техническому регулированию и др. [8].

Сущность стандартизации характеризуется как «деятельность по разработке (ведению), утверждению, изменению (актуализации), отмене, опубликованию и

применению документов по стандартизации и иная деятельность, направленная на достижение упорядоченности в отношении объектов стандартизации» (ст. 2.14. Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации» № 162-ФЗ от 29.06.2015 г. (с изм. на 30.12.2020 г.)). Под объектом стандартизации понимается «продукция (работы, услуги), процессы, системы менеджмента, терминология, условные обозначения, исследования (испытания) и измерения (включая отбор образцов) и методы испытаний, маркировка, процедуры оценки соответствия и иные объекты» (ст. 2.6. Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации» № 162-ФЗ от 29.06.2015 г. (с изм. на 30.12.2020 г.)).

Нормативно-правовые основы стандартизации, закреплённые в Федеральном законе «О стандартизации в Российской Федерации» № 162-ФЗ от 29.06.2015 г. (с изм. на 30.12.2020 г.), дополняются аспектами обеспечения процессов технического регулирования. Ключевым нормативным документом в этом отношении является Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (с изменениями на 2 июля 2021 г.) (редакция, действующая с 23 декабря 2021 г.).

Одним из значимых компонентов процесса технического регулирования является принятие технических регламентов. Ст. 2. Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» определяет технический регламент как документ, который принят в соответствующем порядке и устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования.

Правовые основы регулирования стандартизации в Российской Федерации закрепляются совокупностью документов по стандартизации. К документам по стандартизации в соответствии со ст. 14 Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации» № 162-ФЗ от 29.06.2015 г. (с изм. на 30.12.2020 г.) относятся: документы национальной системы стандартизации; общероссийские классификаторы; стандарты организаций, в том числе технические условия; своды правил; документы по стандартизации, которые устанавливают обязательные требования в отношении оборонной продукции; технические спецификации (отчёты).

Методологические основы системы и процесса стандартизации раскрываются в комплексе международных, региональных и национальных стандартов. К международной стандартизации наряду со стандартами ИСО, МЭК, совместными стандартами ИСО/МЭК относятся руководства ИСО (ISO Guide), руководства ИСО/МЭК (ISO/IEC Guide), технические отчёты ИСО (ИСО/ТО, ISO/TR), международные стандартизированные профили (ИСО/МЭК МСП, ISO/IEC ISP), оценки технологических направлений (ИСО/ОТН, ISO/ТТА), рекомендации ИСО (ИСО/Р, ISO/R), технические условия ИСО (ИСО/ТУ, ISO/TS), общедоступные технические условия ИСО (ИСО/ОТУ, ISO/PAS), отраслевые технические соглашения ИСО (ИСО/ОТС, ISO/ITA). В контексте аспектов разработки корпоративных стандартов отметим стандарты ИСО/МЭК 2: 2004 и ИСО /МЭК 17000:2004.

При разработке корпоративных стандартов следует опираться на ряд межгосударственных и национальных стандартов, в которых раскрываются общие положения, термины и определения, рекомендации, правила разработки и принятия, требования к структуре, содержанию и оформлению и др. (ГОСТ 1.0-2015, ГОСТ 1.2-2015, ГОСТ 1.3-2014, ГОСТ 1.4-2015, ГОСТ 1.5-2001). Аналогично следует указать ряд национальных стандартов, содержащих термины и определения, общие требования, правила и рекомендации разработки, утверждения, обновления и оформления стандартов, правила проведения экспертизы проектов стандартов и др. (ГОСТ Р 1.2-2020, ГОСТ Р 1.5-2012, ГОСТ Р 1.6-2013, ГОСТ Р 1.7-2014, ГОСТ Р 1.8-2011, ГОСТ Р 1.10-2004. Группа Т 50, ГОСТ Р 1.12-2020, ГОСТ Р 1.16).

Стандарты организации могут разрабатываться на продукцию, процессы, услуги, реализуемые организацией. Объектами стандартизации внутри организации могут быть

продукция, услуги, процессы, в том числе процессы менеджмента, технологии, методы и методики бизнес-процессов и др.

В ГОСТ Р 1.4-2004 характеризуются основные требования, которым должны соответствовать стандарты организации:

- нормам действующего законодательства Российской Федерации;
- требованиям технических регламентов и национальных российских стандартов, международным стандартам ИСО, МЭК и др.
- требованиям программ (планов) стандартизации организации и предложений её структурных подразделений;
- требованиям к структуре, содержанию и оформлению стандартов с учётом ГОСТ Р 1.5-2012 и ГОСТ Р 1.12-2020 и др.

Согласно ст 21. Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации» № 162-ФЗ от 29.06. 2015 г. (с изм. на 30.12.2020 г.) стандарты организаций разрабатываются с учётом необходимости их применения для обеспечения целей стандартизации и совершенствования бизнес-процессов.

В интересах эффективного регулирования процесса стандартизации в организации могут создаваться службы стандартизации. Единые правила создания и функционирования служб стандартизации организаций закрепляются национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 1.15-2017. Среди целей данных структурных подразделений стоит выделить:

- выполнение требований технических регламентов организации;
- повышение уровня безопасности для жизни и здоровья персонала организации;
- повышение уровня безопасности производственных объектов;
- обеспечение сохранности имущества организации;
- соблюдение требований защиты окружающей среды;
- повышение качества и конкурентоспособности продукции и услуг организации;
- экономия и рациональное использование ресурсов;
- повышение уровня унификации технологических процессов и оборудования;
- обеспечение информационной безопасности;
- обеспечение сопоставимости результатов измерений, испытаний, технических и экономико-статистических данных на объектах организации;
- обеспечение совместимости и взаимозаменяемости продукции и материалов, выпускаемых или применяемых в организации;
- нормативное обеспечение управления производством, в том числе при создании и функционировании интегрированных систем менеджмента, включая интегрированную систему менеджмента безопасности промышленного производства и др.

К основным направлениям деятельности службы стандартизации в организации следует отнести:

- организационное обеспечение работ по стандартизации;
- проведение исследований в области стандартизации;
- разработку в организации стандартов и других документов;
- внедрение стандартов, информационно-технических справочников и сводов правил;
- контроль за применением стандартов, технических регламентов и сводов правил;
- формирование и ведение фонда документов по стандартизации;
- повышение уровня знаний в области стандартизации и др.

Одним из ключевых направлений деятельности службы стандартизации является разработка стандартов организации, технических условий, сводов правил и другой

нормативной и технической документации организации. При проведении экспертизы проектов стандартов и проектов изменений следует руководствоваться требованиями ГОСТ Р 1.6. При осуществлении нормоконтроля проекта стандарта или изменений к нему необходимо руководствоваться требованиями, закреплёнными в межгосударственных стандартах ГОСТ 1.3 и ГОСТ 1.5, национальными российскими стандартами ГОСТ Р 1.7 и ГОСТ Р 1.5, а также требованиями действующих стандартов организации. При отсутствии организационных стандартов следует ориентироваться на требования ГОСТ 1.5, применяя их на уровне организации.

Служба стандартизации проводит многоплановую деятельность по внедрению стандартов в организации. Служба стандартизации обеспечивает своевременную информированность заинтересованных структурных подразделений об утверждённых (принятых) стандартах различного уровня. В процессе внедрения стандартов, технических регламентов, сводов правил и других нормативных документов, связанных со стандартизацией, службы стандартизации организации реализует следующие виды работ:

- пересмотр, внесение изменений или отмена стандартов, технических условий и других нормативных документов, действующих в данной организации;
- корректировка технической документации;
- разработка новой документации;
- обеспечение организации необходимым оборудованием для совершенствования производственных процессов,
- внедрение необходимых изменений технологических процессов;
- обеспечение процедуры соответствия продукции (процессов) требованиям принятого технического регламента, стандарта и др.;
- повышение квалификации сотрудников организации и др.

В процессе разработки и внедрения стандартов и регламентов служба стандартизации взаимодействует с другими структурными подразделениями, проводит анализ технических и экономических возможностей предприятий. Кроме того, исследуются аспекты, связанные с целесообразностью внедрения стандартов, вопросы влияния внедрения стандартов на конкурентоспособность промышленных предприятий, осуществляется оценка совместимости с действующими стандартами и др. Служба стандартизации принимает участие в контроле за соблюдением требований стандартов, технических регламентов, сводов правил и другой документации по стандартизации, в частности проведение внутреннего аудита системы менеджмента качества, подготовка продукции к сертификации и др. Служба стандартизации обеспечивает документационное обеспечение процесса стандартизации, своевременно оформляет необходимые документы (протоколы, акты, отчёты и др.).

Служба стандартизации ведёт учёт действующих стандартов, технических условий, технических регламентов, сводов правил и других документов по стандартизации, обеспечивает хранение контрольных экземпляров документов.

Обязательным компонентом стандартов промышленных предприятий атомной отрасли являются аспекты безопасности. Аспекты безопасности касаются широкого комплекса продуктов, процессов, услуг, систем (продукции и систем). Возрастающая технологическая сложность современного производства требует первоочередного внимания к аспектам безопасности. Основополагающими стандартами РФ, обеспечивающими эффективность внедрения аспектов безопасности в деятельность организаций, являются Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57149-2016, соответствующий стандарту ISO/IEC Guide 51:2014, «Аспекты безопасности. Руководящие указания по включению их в стандарты», а также Государственный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 51898-2002 «Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты» [9, 10]. Указанные стандарты содержат требования и рекомендации для разработчиков по включению любых аспектов безопасности в

стандарты различных отраслей и уровней, включая корпоративные. Национальные стандарты могут применяться ко всем аспектам безопасности, относящимся к людям, имуществу или окружающей среде, к одной из этих составляющих или их комбинации.

Стандарты раскрывают ключевые понятия, связанные с безопасностью. Под опасностью понимается «потенциальный источник возникновения ущерба». Ущерб характеризуется как «нанесение физического повреждения или вреда здоровью людей, или вреда имуществу или окружающей среде». Безопасность трактуется как «отсутствие недопустимого риска». Соответственно риск – это «сочетание вероятности ущерба и тяжести этого ущерба». Допустимый риск – «уровень риска, который в рассматриваемой области считается допустимым при современных общественных ценностях».

Разработчики стандартов должны уделять внимание аспектам безопасности для предназначенного использования и возможного предсказуемого неправильного использования продукции и систем, разработать меры, направленные на уменьшение рисков и достижение их допустимого уровня. Кроме того, разработчикам стандартов следует предусмотреть последствия неправильного использования продукции и систем, разработать комплекс мер по уменьшению рисков. Сами стандарты также должны содержать информацию по аспектам безопасности и указания по снижению и сохранению уровня допустимого риска.

В разделе 7 стандартов ГОСТ Р 57149-2016 и ГОСТ Р 51898-2002 раскрываются основные характеристики аспектов безопасности, которые следует учитывать при разработке стандартов. Так в п. 7.1 систематизируются (структурируются) типы стандартов на безопасность. Определяются следующие типы стандартов безопасности:

- основополагающие стандарты на безопасность, включающие фундаментальные концепции, принципы и требования, относящиеся к основным аспектам безопасности, и применимые для широкой номенклатуры продукции и систем;
- групповые стандарты на безопасность, включающие аспекты безопасности, применимые к нескольким видам или к семейству близких видов продукции или систем;
- стандарты на безопасность продукции, включающие аспекты безопасности определенного вида или семейства продукции;
- стандарты, содержащие аспекты безопасности, но которые касаются не только аспектов безопасности и в которых учитываются требования основополагающих и групповых стандартов на безопасность.

В последующих пунктах данного раздела указанных стандартов (пп. 7.2-7.4) содержатся основные требования к структуре и содержанию стандартов, включающих аспекты безопасности, и общая характеристика основных этапов разработки подобных стандартов: предварительный анализ предлагаемых новых стандартов; подготовительная информационная и организационная работа; разработка проектов стандартов.

ГОСТ Р 57149-2016 и ГОСТ Р 51898-2002 содержат конкретные правила и рекомендации по разработке стандартов, касающихся аспектов безопасности. Разработчики стандартов должны знать об опасностях и опасных ситуациях, связанных с продуктом или системой, на которую распространяется действие стандарта. Требования к мерам по уменьшению рисков (защитным мерам) следует излагать точным и понятным языком, технически правильно. Стандарты должны содержать ясные и полные формулировки, определяющие методы проверки выполнения этих требований.

В стандарте на продукцию и системы следует ясно указывать, какая информация по безопасности продукта, его реализации и эксплуатации (технического обслуживания, включая уровень профессиональной подготовки обслуживающего персонала; требования к индивидуальной защите; утилизации). Кроме того,

информация по безопасности продукции (системы) должна характеризовать безопасность условий работы. Инструкции должны включать рекомендации по устранению или уменьшению рисков возникновения опасных ситуаций, в том числе связанных с неправильной эксплуатацией продукции и систем. В стандартах должны содержаться требования по применению предупреждающих об опасности надписей. Эти надписи должны быть заметными, чёткими, долговечными, понятными, написанными на официальном языке страны эксплуатации продукции и систем, краткими и однозначными по смысловому содержанию. При необходимости стандарты должны устанавливать требования к упаковке продукции с целью обеспечения гарантии надлежащего обращения, сохранения целостности, транспортировки, хранения продукции, устранения или минимизации опасности повреждения, заражения или загрязнения продукции [9, 10].

Объективно значимость обеспечения национальной, экономической, производственной безопасности возрастает в чрезвычайных ситуациях. Правовые основы обеспечения безопасности промышленного производства предполагают широкую совокупность документов. Укажем лишь некоторые: Федеральный закон от 28 декабря 2010 г. № 390-ФЗ «О безопасности», Федеральный закон от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации», Федеральный закон от 12 июля 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике», Федеральный закон от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации», Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных промышленных объектов», Стратегия национальной безопасности Российской Федерации, утверждённая Указом Президента РФ от 2 июля 2021 г. № 400, Стратегия экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 г., утверждённая Указом Президента РФ от 13 мая 2017 г. № 208, Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утверждённая Указом Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642, Основы государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу, утверждённые Указом Президента РФ от 6 мая 2018 г. № 198 и др.

Наряду с правовыми документами отметим некоторые национальные стандарты, связанные с обеспечением безопасности в чрезвычайных ситуациях природного, биосоциального, техногенного характера, характеризующие специфику гражданской обороны, менеджмента риска, раскрывающих общие положения, понятийный аппарат и др. (ГОСТ 22.0.03, ГОСТ 22.0.04, ГОСТ 22.0.05, ГОСТ 22.1.02, ГОСТ Р 1.0, ГОСТ Р 22.0.02, ГОСТ Р 22.0.11, ГОСТ Р 22.3.05, ГОСТ Р 42.0.02, ГОСТ Р 42.2.01, ГОСТ Р 55059-2012, ГОСТ Р 55201-2012).

Отдельно отметим национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 22.2.12-2020 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Повышение устойчивости функционирования организаций в чрезвычайных ситуациях. Основные положения». В данном стандарте характеризуются основные аспекты безопасности, обеспечивающие устойчивость функционирования объектов экономики и жизнеобеспечения населения при военных конфликтах и в условиях чрезвычайных ситуаций. Исключительное внимание в этом отношении уделяется устойчивости функционирования промышленных объектов.

Систематическая работа по обеспечению безопасности должна обеспечиваться в мирное время. Значительная роль в этом отношении отводится задачам и направлениям формирования и развития культуры безопасности.

Одним из значимых направлений формирования и развития культуры безопасности является культура безопасности жизнедеятельности. Нормативные требования к культуре безопасности ориентированы на задачи профилактики, минимизации угроз и негативных последствий чрезвычайных ситуаций, то есть

обстоятельств, сложившихся в результате аварий, опасных природных явлений, катастроф, стихийных бедствий и др. Общие нормы и требования культуры безопасности жизнедеятельности фиксируются в Национальных стандартах Российской Федерации по обеспечению безопасности в чрезвычайных ситуациях (ГОСТ Р 22.3.07-2014, ГОСТ Р 22.3.08-2014) [11, 12].

Культура безопасности жизнедеятельности – составная часть общей культуры личности (социальной группы), «характеризующая уровень подготовки в области безопасности жизнедеятельности и осознанную потребность в соблюдении норм и правил безопасного поведения». Основы безопасности жизнедеятельности трактуются как определённый «уровень знаний, умений и навыков по основным аспектам безопасности, получаемый человеком в семье и образовательных учреждениях дошкольного и общего образования» [11]. Обеспечение высокого уровня культуры безопасности жизнедеятельности, включая профессиональную деятельность, должно непрерывно обеспечиваться посредством целенаправленной работы личности, трудового коллектива, общества, государства.

Основными целями формирования культуры безопасности жизнедеятельности являются [11]:

- обеспечение безопасности человека, общества и государства;
- снижение влияния человеческого фактора на риски и угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций;
- оптимизация затрат при реализации мероприятий по защите людей и территорий от чрезвычайных ситуаций;
- минимизация количества пострадавших в чрезвычайных ситуациях.

В заключении важно подчеркнуть, что значительный вклад в разработку ключевых аспектов культуры безопасности непрерывно вносит атомная промышленность [13-16]. Процесс формирования и совершенствования культуры производственной безопасности обосновывает роль корпоративных стандартов культуры производственной безопасности промышленных объектов атомной отрасли. Универсальных стандартов по аспектам культуры производственной безопасности нет. Методологические основы разработки и внедрения корпоративных стандартов культуры производственной безопасности определяются стратегическими целями безопасности и нормативно-правовой базой, обеспечивающей функционирование промышленного объекта атомной отрасли.

Основными результатами исследования являются общая характеристика концептуальных основ процесса стандартизации бизнес-процессов; анализ аспектов управления и ключевых тенденций государственной политики Российской Федерации в области стандартизации как основы регулирования процессов стандартизации на локальном уровне; актуализация значимости роли службы стандартизации в процессе разработки и внедрения корпоративных стандартов промышленных предприятий, включая предприятия атомной промышленности; обоснование значимости корпоративных стандартов культуры производственной безопасности как инструмента совершенствования системы безопасности предприятий атомной промышленности. Ключевые аспекты стандартизации и совершенствования культуры производственной безопасности следует рекомендовать руководителям организаций, предпринимателям, специалистам, исследующим и реализующим задачи повышения эффективности современных бизнес-процессов промышленных предприятий.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Джестон, Дж.* Управление бизнес-процессами: практическое руководство по успешной реализации проектов / Джон Джестон, Йохан Нелис; пер. с англ. – Москва : Альпина Паблишер, 2012 – 644 с.

2. *Армстронг, М.* Управление результативностью. Система оценки результатов в действии / М. Армстронг, А. Бэрн; пер. с англ. – Москва : Альпина Паблишер, 2012. – 384 с.
3. *Кокинз, Г.* Управление результативностью: как преодолеть разрыв между объявленной стратегией и реальными процессами / Г. Кокинз; пер. с англ. – Москва : Альпина Паблишер, 2016. – 318 с.
4. *Лыскова, И.Е.* Приверженность руководства целям производственной безопасности как фактор формирования интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий / И.Е. Лыскова // Глобальная ядерная безопасность. – 2021. – № 4(41). – С. 73-91.
5. *Лыскова, И.Е.* Контроль реализации управленческих решений в процессе управления культурой производственной безопасности промышленных предприятий / И.Е. Лыскова // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. № 2. – С. 79-92.
6. *Лыскова, И.Е.* Методологические основы управления результативностью культуры производственной безопасности промышленных предприятий / И.Е. Лыскова // Экономическая безопасность. – 2022. – Том 5, № 2. – С. 601-622.
7. *Техническое регулирование.* Проблемы и решения. Обзор международных организаций по стандартизации / Комплексное обеспечение нормативно-технической информацией на основе современных технологий // Центр нормативно-технической документации «Регламент». – URL : <https://cntd-reglament.ru> (дата обращения: 26.10.2022)
8. *Положение о Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии:* Постановление Правительства Российской Федерации от 17.05.2004 г. № 294 (с изменениями на 29.10.2021 г.). – URL : <https://www.rst.gov.ru/portal/gost//home/about/subjectactivity> (дата обращения: 26.10.2022)
9. *Аспекты безопасности.* Руководящие указания по включению их в стандарты. / ГОСТ Р 57149-2016 Национальный стандарт Российской Федерации. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 14 с.
10. *Аспекты безопасности.* Правила включения в стандарты / ГОСТ Р 51898-2002. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 6 с.
11. *Безопасность в чрезвычайных ситуациях.* Культура безопасности жизнедеятельности. Общие положения / ГОСТ Р 22.3.07-2014 Национальный стандарт Российской Федерации. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 6 с.
12. *Безопасность в чрезвычайных ситуациях.* Культура безопасности жизнедеятельности. Термины и определения / ГОСТ Р 22.3.08-2014 Национальный стандарт Российской Федерации. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 5 с.
13. *Культура безопасности.* Серия изданий по безопасности, 1991, № 75, INSAG-4 / Международная консультативная группа по ядерной безопасности // МАГАТЭ, Вена. – URL : [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882r_web.pdf) (дата обращения: 26.10.2022).
14. *Менеджмент эксплуатационной безопасности на атомных электростанциях,* 2015, INSAG-13 / Международная консультативная группа по ядерной безопасности // МАГАТЭ, Вена. – URL : [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1083r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1083r_web.pdf) (дата обращения: 26.10.2022).
15. *Ключевые вопросы практики повышения культуры безопасности,* 2015, INSAG-15 / Международная консультативная группа по ядерной безопасности // МАГАТЭ, Вена. – URL : [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1137r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1137r_web.pdf) (дата обращения: 26.10.2022).
16. *WANO Principles 2013-1.* Особенности здоровой культуры ядерной безопасности. – URL : <https://www.wano.info/getmedia/ee3efef8-6edf-4768-9228-440e12a218f3/WANO-PL-2013-1-Pocketbook-Russian.pdf.aspx> (дата обращения: 26.10.2022).

## REFERENCES

- [1] Jeston John, Nelis Johan. Upravlenie biznes-processami: Prakticheskoe rukovodstvo po uspehnoy realizacii proektov [Business Process Management. Practical Guidelines to Successful Implementations]. Moscow: Alpina Publisher, 2012, 644 p. (in Russian).
- [2] Armstrong M., Beron A. Upravlenie rezultativnostyu. Sistema otsenki rezultatov v deystvii [Performance Management. Results Evaluation System in Action]. Moscow: Alpina Publisher, 2012, 384 p. (in Russian).
- [3] Kokinz G. Upravlenie rezultativnostyu: Kak preodolet razryv mezhdru obyavlennoy strategiej i realnymi protsessami [Performance Management: How to Bridge the Gap between the Announced Strategy and Real Processes]. Moscow: Alpina Publisher, 2016, 318 p. (in Russian).

- [4] Lyskova I.E. Priverzhennost' rukovodstva celyam proizvodstvennoj bezopasnosti kak faktor formirovaniya integrirovannoj sistemy menedzhmenta bezopasnosti promyshlennyh predpriyatij [Commitment of the Management to the Goals of Industrial Safety as a Factor in the Formation of an Integrated Management System for the Safety of Industrial Enterprises], *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety], 2021, no. 4(41), pp. 73-91 (in Russian).
- [5] Lyskova I.E. Kontrol' realizacii upravlencheskih reshenij v processe upravleniya kul'turoj proizvodstvennoj bezopasnosti promyshlennyh predpriyatij [Management Decision Implementation Monitoring in the Process of Managing Culture of Industrial Enterprise Production Safety], *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety], 2022, no. 2, pp.79-92 (in Russian).
- [6] Lyskova I.E. Metodologicheskie osnovy upravleniya rezul'tativnost'yu kul'tury proizvodstvennoj bezopasnosti promyshlennyh predpriyatij [Methodological Bases of Managing the Performance of the Occupational Safety Culture in Industrial Enterprises], *Ekonomicheskaya bezopasnost'* [Economic Safety], 2022, vol 5, no. 2, pp. 601-622 (in Russian).
- [7] Tekhnicheskoe regulirovanie. Problemy i resheniya. Obzor mezhdunarodnyh organizacij po standartizacii [Technical Regulation. Challenges and Solutions. Overview of International Standardisation Organisations], Centr normativno-tekhnicheskoy dokumentacii «Reglament». Kompleksnoe obespechenie normativno-tekhnicheskoy informaciej na osnove sovremennyh tekhnologij [Reglament Centre for Regulatory and Technical Documentation. Comprehensive Provision of Normative and Technical Information Based on Modern Technology], <https://cntd-reglament.ru> (accessed 26.10.2022) (in Russian).
- [8] Polozhenie o Federal'nom agentstve po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii: Postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 17.05.2004 g. № 294 (s izmeneniyami na 29.10.2021 g.) [Regulation on the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology: Decree of the Government of the Russian Federation of 17.05.2004 No. 294 (as amended on 29.10.2021)], <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/about/subjectactivity> (accessed: 26.10.2022) (in Russian).
- [9] GOST R 57149-2016 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Aspekty bezopasnosti. Rukovodyashchie ukazaniya po vklyucheniyu ih v standarty [STATE STANDARD R 22.3.08-2014. National Standard of the Russian Federation. Aspects of security. Guidelines for including them in standards]. Moscow: Standartinform, 2016. – 14 p. (in Russian).
- [10] GOST R 51898-2002. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Aspekty bezopasnosti. Pravila vklyucheniya v standarty [STATE STANDARD R 22.3.08-2014. National Standard of the Russian Federation. Aspects of security. Rules for inclusion in standards]. Moscow: Standartinform, 2016, 6 p. (accessed: 26.10.2022) (in Russian).
- [11] GOST R 22.3.07-2014. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Bezopasnost' v chrezvychajnyh situacijah. Kul'tura bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti. Obshchie polozheniya. [STATE STANDARD P 22.3.07-2014. National Standard of the Russian Federation. Safety in Emergency Situations. Life Safety Culture. General Provisions]. Moscow: Standartinform, 2019, 6 p. (in Russian).
- [12] GOST R 22.3.08-2014. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Bezopasnost' v chrezvychajnyh situacijah. Kul'tura bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti. Terminy i opredeleniya [STATE STANDARD R 22.3.08-2014. National Standard of the Russian Federation. Safety in Emergency Situations. Life Safety Culture. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform, 2019, 5 p. (in Russian).
- [13] Mezhdunarodnaya konsul'tativnaya gruppa po yadernoj bezopasnosti. Kul'tura bezopasnosti. Seriya izdanij po bezopasnosti, №75-INSAG-4 [INSAG-4. IAEA. International Nuclear Safety Advisory Group. Safety Culture. Safety Issue Series, 1991. NO.75-INSAG-4], MAGATE. Vena, 1991, [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882r_web.pdf) (accessed 26.10.2022) (in Russian).
- [14] Mezhdunarodnaya konsul'tativnaya gruppa po yadernoj bezopasnosti. Menedzhment ekspluatacionnoj bezopasnosti na atomnyh elektrostanciyah.. INSAG-13 [INSAG-13. IAEA. International Nuclear Safety Advisory Group. Operational Safety Management in Nuclear Power Plants. 2015. INSAG-13], MAGATE. Vena, 2015, 32 p., [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1083r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1083r_web.pdf) (accessed 26.10.2022) (in Russian).
- [15] Mezhdunarodnaya konsul'tativnaya gruppa po yadernoj bezopasnosti. Klyuchebye voprosy praktiki povysheniya kul'tury bezopasnosti. INSAG-15 [INSAG-15. IAEA. International Nuclear Safety Advisory Group. Key Issues in Safety Culture Enhancement Practices. 2015. INSAG-15], MAGATE. Vena, 2015, [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1137r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1137r_web.pdf) (accessed 26.10.2022) (in Russian).
- [16] WANO Principles 2013-1. Osobennosti zdorovoj kul'tury yadernoj bezopasnosti [WANO Principles for a Strong Nuclear Safety Culture. Guideline WANO GL 2006-02. Wano gl.],

<https://www.wano.info/getmedia/ee3efef8-6edf-4768-9228-440e12a218f3/WANO-PL-2013-1-Pocketbook-Russian.pdf.aspx> (accessed 26.10.2022) (in Russian).

## **Methodological Foundations of Development and Implementation of Corporate Standards of Production Safety Culture of Industrial Enterprises**

**Irina E. Lyskova**

*The Komi Republican Academy of State Service and Administration, Kommunisticheskaya St., 11, Syktyvkar,  
Komi Republic, Russia 167000*

*IrinaLyskova@mail.ru; ORCID iD: 0000-0003-2748-2794; WoS ResearherID: T-1644-2018*

*Received by the editorial office on 09/05/2022*

*After revision on 11/23/2022*

*Accepted for publication 11/29/2022*

*Abstract.* The article updates the methodological foundations and practical aspects of managing the production safety culture of industrial enterprises. The importance of corporate standards of production safety culture as a tool for managing industrial safety of industrial enterprises is emphasized. The general characteristics of the regulatory framework contributing to the development and implementation of corporate standards of production safety culture of industrial enterprises are proposed.

*Keywords:* state policy in the field of standardization, production safety, production safety culture, management of production safety culture, corporate standards, standardization services.

*For citation:* Lyskova I.E. Methodological Foundations of Development and Implementation of Corporate Standards of Production Safety Culture of Industrial Enterprises // Global Nuclear Safety. 2022. No. (45). P. 87-100. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-09>.

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И  
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**  
SAFETY CULTURE AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS  
DEVELOPMENT OF PLACEMENT TERRITORIES  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 378.4 : 331.546 : 621.039  
DOI 10.26583/gns-2022-04-10  
EDN JHPTVU

**РОЛЬ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ИНИЦИАТИВ ВУЗА В СЕРВИСНО-  
ИНФРАСТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ГОРОДА  
ПРИСУТСТВИЯ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ» НА ПРИМЕРЕ  
ВИТИ НИЯУ ВИТИ**

© 2022 Руденко Валентина Анатольевна<sup>1</sup>, Привалова Наталия Федоровна<sup>2</sup>,  
Томилин Сергей Алексеевич<sup>3</sup>, Попова Татьяна Сергеевна<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup> *VARudenko@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>*

<sup>2</sup> *NFPrivalova@mephi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6464-188>*

<sup>3</sup> *SATomilin@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>*

<sup>4</sup> *TSPopova@mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>*

*Аннотация.* В работе рассматривается модель сервисно-инфраструктурного развития города Волгодонска, которая опирается на подход, учитывающий сложившийся на территории городской агломерации потенциал и направленный на более интенсивное использование имеющихся возможностей. В результате реализации Стратегии своего социально-экономического развития до 2030 года город Волгодонск должен стать городом научно-технической интеллигенции. И немаловажная роль в достижении этой миссии отводится Волгодонскому инженерно-техническому институту – филиалу НИЯУ МИФИ. Данный вуз рассматривается как драйвер «интеллектуального процветания» территории расположения предприятий ГК «Росатом». ВИТИ НИЯУ МИФИ транслирует на территории региона интересы НИЯУ МИФИ, как стратегического партнера ГК «Росатом» в сфере подготовки кадров. Стратегия развития ВИТИ НИЯУ МИФИ направлена на сохранение и приумножение достигнутых результатов с учетом современных трендов развития образования и устанавливает ключевые цели, задачи, конкретные направления, механизмы, обеспечивающие дальнейшее развитие института на современном этапе функционирования системы ВО.

*Ключевые слова:* Волгодонский инженерно-технический институт, драйверы развития высшего образования, атомная промышленность, энергетический комплекс, территория расположения АЭС, социально-экономическое развитие региона, инфраструктурные проекты, инфраструктурно-сервисный подход, образовательная организация, образовательный процесс, стратегия развития вуза.

*Для цитирования:* Руденко В.А., Привалова Н.Ф., Томилин С.А., Попова Т.С. Роль и значение стратегических инициатив ВИТИ НИЯУ МИФИ в сервисно-инфраструктурной модели развития городов присутствия Госкорпорации «Росатом» // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 101-116. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-10>.

Поступила в редакцию 09.09.2022

После доработки 15.11.2022

Принята к печати 21.11.2022

Для того чтобы понять сущность, осознать актуальность и значимость использования модели сервисно-инфраструктурного развития в стратегическом управлении территорией, стоит для начала разобраться в содержании категорий, входящих в состав такой модели. Под территориальной инфраструктурой принято понимать объект или систему, которые обеспечивают предоставление сервиса. Сервис, в свою очередь, – это услуга, удовлетворяющая отдельный запрос жителей той или иной территории.

Сервисно-инфраструктурный подход к развитию регионов и муниципальных образований опирается на потенциал территорий, направлен на интенсивное использование ими своих возможностей, основан на рассмотрении инфраструктуры сквозь призму человеческих потребностей. Именно под эти запросы должны быть предприняты попытки адаптировать территорию и ее инфраструктуру. Инфраструктура, физические объекты и городские пространства – это способ реализации потребностей жителей. То есть они являются инструментами достижения цели, а не самой целью. Зачастую сервисы способны удовлетворить запросы горожан гораздо быстрее и дешевле, чем имеющиеся на территории физические объекты. [1]

В России сейчас более полутысячи индустриальных городов, построенных еще в советское время, созданных для достижения целей плановой экономики, выполнения программ промышленного развития. Во многих из них наблюдаются все признаки кризиса – отток населения, обветшание жилья и инфраструктуры, сильное замедление темпов развития городской среды. Многие из этих городов небольшие, с населением от 5 тыс. до 100 тыс. человек. Из-за невысокой численности они не могут стать участниками нацпроектов по созданию социальных объектов, инфраструктуры, дорог, при этом вклад таких городов в бюджет государства в среднем в два раза превышает показатели по России. Формирование и апробация новой модели даст возможность значительно повысить качество жизни населения в таких городах и применять «точечный» подход к развитию каждой территории.

183 города (или каждый четвертый из этого списка) – это территории присутствия госкорпораций, научно-исследовательских институтов, крупнейших производственных комплексов – то есть города с высоким научным и технологическим потенциалом, вклад которых в валовой внутренний продукт около 20%. В этой связи многие «атомные» города вошли в пилотный проект по отработке так называемого сервисно-инфраструктурного подхода к городскому развитию. Волгодонская агломерация – не является исключением и, как город присутствия предприятий Госкорпорации «Росатом», при разработке стратегии своего развития тоже должна брать в расчет описываемую модель.

К разработке сервисно-инфраструктурной модели развития территорий были привлечены многие серьезные организации-эксперты (рис. 1).

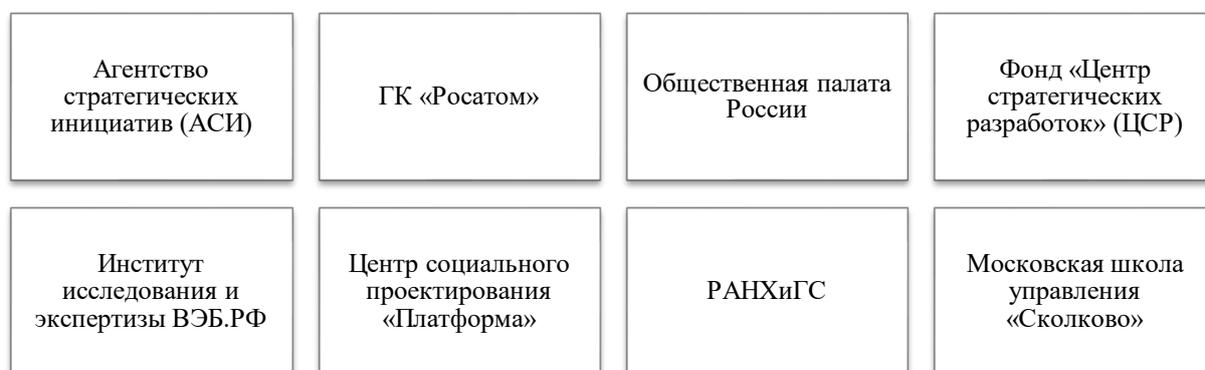


Рисунок 1 – Субъекты, ответственные за разработку сервисно-инфраструктурной модели развития территорий [Entities are responsible to develop a service and infrastructure model of territorial development]

Сейчас подходы к городскому развитию в России основаны на двух принципах:

- подушевом, который предполагает объемы финансирования в зависимости от численности населения;
- пространственном, в соответствии с которым некоторые города объединяются в агломерации для достижения синергетического эффекта.

В рамках программы «Новая миссия городов», разработанной Агентством стратегических инициатив, предложено применить новый принципиальный подход – определять потенциал развития городов в зависимости от их социального и экономического профиля и применять адресный подход к развитию каждой конкретной территории.

Инфраструктурно-сервисный подход предполагает максимальное удовлетворение потребностей и запросов человека, а также создание условий для работы и жизни. Это программа развития города, учитывающая его вклад в подъем и процветание страны и достижение национальных целей вне зависимости от численности населения. Это не только вложение в новые инфраструктурные объекты и строительство новых квадратных метров, но и удовлетворение потребностей его жителей – привлечение и удержание человеческого ресурса за счет развития сервисов и «донастройки» над базисом существующей инфраструктуры.

Зачастую развитие сервисов способно удовлетворить запросы горожан гораздо быстрее и дешевле, чем строительство объектов инфраструктуры. Так, например, школа параллельно с выполнением образовательной функции может предоставлять окрестным жителям другие сервисы, например в области массового спорта, дополнительного образования и культурно-досуговых мероприятий для самой широкой аудитории. Таким образом, один капитальный объект может одновременно выполнять несколько функций и оказывать несколько сервисов для разных групп горожан. Такой подход позволяет отказаться от создания «городского мегапроекта» в пользу более точечных проектов, востребованных жителями. Этот подход применим ко многим направлениям в развитии социальной сферы и благоустройства территорий. Для реализации подобных проектов необходимо пересмотреть ряд ограничений в использовании инфраструктуры и изменить подход к управлению. В пилотных городах будет проведен комплексный анализ факторов, влияющих на местное самоуправление, разработан план реализации проектов и мероприятий, сформированы нормативно-правовые акты, определяющие механизмы и источники финансирования. [3]

В России сложившаяся инфраструктура производительных сил – наследник той модели, которая применялась при нескольких волнах индустриализации в Советском Союзе, то есть ресурс зачастую находится в городах, которые создавались как законченные циклы производства продукта. При этом, когда город строился, он сразу обеспечивался школами, больницами, домами культуры, театрами, парками – всем, что необходимо жителям. Сегодня, чтобы людям в городе жилось и работалось хорошо, нужны тысячи решений, которые делятся на несколько групп. Во-первых, это наличие качественной инфраструктуры, соответствующей современным запросам и потребностям. Если соответствия не будет, специалисты и их семьи не захотят жить в таком городе. Во-вторых, это социальные ресурсы, ресурсы отношений между людьми. Эта группа, как показывает практика и опыт, не менее важна, чем предыдущая. В-третьих, это управленческие ресурсы, компетенции, процедуры, наличие обратных связей, заложенных в систему управления.

Для компании, имеющей национальное значение, коими и являются предприятия ГК «Росатом», доступно влияние на каждую из этих трех составляющих. Как правило, подобные предприятия выполняют функцию, замещающую и дополняющую возможности органов власти и бюджетный ресурс для создания инфраструктурных решений в регионе. Проблема в том, что это не вписывается в существующую систему

законодательства, поэтому средства, заработанные компаниями, не всегда могут применяться для решения задач развития территорий.

Вся модель территориальной политики в стране сейчас ориентирована на рост и развитие агломераций. Но сегодня очень жестко встала задача по выработке новых правил, потому что старое монетарное правило – чем больше в городе живет людей, тем больше средств на его развитие выделяется – работать больше не будет. А если такое правило сохранится, то это приведет к существенному ухудшению условий жизни людей в тех малых городах, которые сегодня создают очень нужные компоненты и технологии, чей вклад в «общий котел» страны достаточно велик.

В связи с этим и появилась необходимость создания новой модели и методов расчета того, какие средства и на что должны быть направлены в города для обеспечения их развития – в сочетании с пониманием, что на территориях должны обеспечиваться не только инфраструктура, но и качество управления, и качество социальных процессов и явлений. И с пониманием того, что чем более интеллектуально развитый человеческий ресурс задействован в производстве, тем большее количество сервисов должно быть выстроено на территории.

В Методических рекомендациях Минэкономразвития РФ, отмечается, что стратегии развития отраслей экономики должны разрабатываться в том случае, если удовлетворяют хотя бы одному из перечисленных критериев (рис. 2).

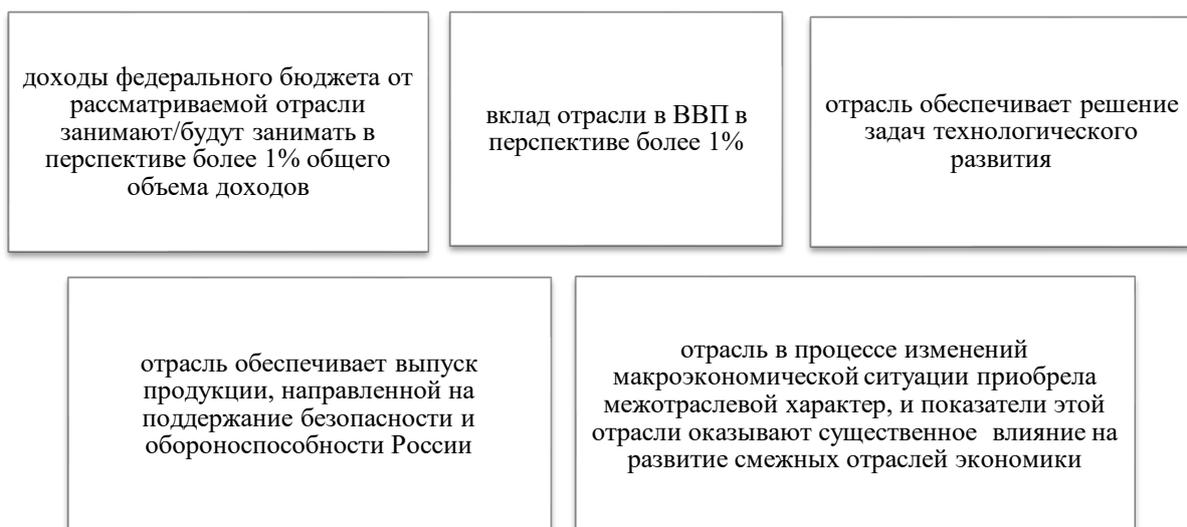


Рисунок 2 – Критерии, которым должны соответствовать отрасли, разрабатывающие стратегии своего развития [Criteria to be met by industries developing their development strategies]

Сфера образования, несомненно, соответствует требованиям, продиктованным Министерством экономического развития РФ, поэтому может и должна быть разработана стратегия развития данной отрасли. В результате трансформации системы высшего образования произошел переход высших заведений в конкурентную среду, что заставило вузы действовать в категориях эффективности и разрабатывать стратегическое видение собственного развития. Выбор стратегии вуза зависит от ряда внешних (рис. 3) и внутренних факторов (рис. 4).

Государственная политика в области образования. Политика государства (учредителя) накладывает внешние ограничения для деятельности образовательной организации. В отношении вузов проводятся процедуры государственной аккредитации, лицензирования, мониторинга эффективности деятельности

Политика Минобрнауки РФ в отношении дифференциации и присвоения вузам разных статусов (федеральные, национальные исследовательские университеты, региональные опорные вузы). Таким образом, политика государства формулирует требования и целевые ориентиры, которые должны быть заложены при формировании стратегии вуза, чтобы обеспечить эффективность его функционирования.

Спрос на образовательные услуги. Разработка стратегии вуза должна основываться на результатах анализа спроса на его образовательные услуги. Такой анализ позволяет определить востребованность образовательных программ и прочих услуг, оказываемых вузом, а также определить характеристики и потребности целевой аудитории – потребителей образовательных услуг.

Уровень конкуренции на рынке образовательных услуг. Вид стратегии, используемой образовательной организацией, во многом зависит от уровня рыночной конкуренции. Чем выше уровень конкурентной борьбы на рынке образовательных услуг, тем выше необходимость формулирования стратегии вуза, определения своих конкурентных преимуществ и позиционирования в образовательном пространстве.

Место расположения вуза оказывает влияние на стратегию привлечения абитуриентов и преподавателей. Так, вузы, расположенные на приграничных территориях, получают возможность привлекать абитуриентов и работников из других регионов страны или из других государств, соответственно, они чаще будут выбирать стратегию по экспансии в соседние регионы.

Рисунок 3 – Внешние факторы, влияющие на стратегию развития вузов [External factors influencing university development strategy]

Размер вуза. От размера вуза зависит возможность диверсификации его деятельности на несколько направлений. Так, при прочих равных условиях стратегии небольших вузов будут в большей мере сфокусированы на основном виде их деятельности, а стратегии крупных вузов могут быть ориентированы на ряд целевых показателей по разным видам деятельности.

Стадия развития вуза. Образовательная организация формулирует стратегические ориентиры, основываясь на располагаемых ресурсах. Поэтому стратегии вузов, находящихся на разных этапах жизненного цикла, будут отличаться степенью формализации, количеством и разнообразием стратегических ориентиров.

Форма собственности вуза. Стратегия образовательной организации также зависит от того, является она государственной или нет. Так, говоря о государственных вузах, можно отметить, что для них существуют широкие возможности поддержки со стороны учредителя.

Профиль и отрасль вуза. Данные факторы оказывают влияние на количество направлений деятельности и образовательных программ вуза, что, в свою очередь, находит отражение в стратегии образовательной организации.

Наличие конкурентных преимуществ (качество предоставляемых услуг, уровень квалификации ППС, наличие современной материально-технической базы, наличие тесных связей с работодателями, удачное географическое расположение и др.). Позволяет вузу позиционировать себя в образовательном пространстве и сформулировать на этой основе стратегию.

Рисунок 4 – Внутренние факторы, влияющие на разработку стратегии развития вузов [Internal factors influencing the design of a university development strategy]

В качестве объекта исследования выступает уникальная территория расположения предприятий сразу четырех дивизионов ГК «Росатом»: город Волгодонск и Волгодонская агломерация. Город Волгодонск, расположенный в восточной части Донского региона, является образовательным центром, как минимум тринадцати районов Ростовской области, и по праву считается уникальным, претендуя на звание «Атомград XXI века». Стратегия социально-экономического развития города Волгодонска до 2030 года утверждена решением Волгодонской городской Думы от 06.12.2018 №77. Вице-губернатор Ростовской области Игорь Гуськов при обсуждении

данного документа процитировал А.П.Чехова: «Если вы будете работать для настоящего, то ваша работа выйдет ничтожной; надо работать, имея в виду только будущее». И эта цитата, по сути, стала девизом концепции «Стратегии 2030». [7]

В результате реализации Стратегии развития Волгодонск должен стать городом научно-технической интеллигенции. И немаловажная роль в достижении этой миссии отводится Волгодонскому инженерно-техническому институту – филиалу НИЯУ МИФИ (далее – ВИТИ НИЯУ МИФИ, Институт). Данный вуз рассматривается как драйвер интеллектуального развития территории расположения объектов Госкорпорации «Росатом».

На рисунке 5 представлена система стратегического развития высшего образования страны, отражающая взаимосвязь разных уровней и место ВИТИ НИЯУ МИФИ в данной «системе координат».



Рисунок 5 – Место Стратегии ВИТИ НИЯУ МИФИ в системе стратегического развития российского образования [The place of VETI NRNU MEPHI Strategy in the system of strategic development of Russian education]

При выявлении ключевых трендов для развития ВИТИ НИЯУ МИФИ, необходимо «просканировать» национальный и региональный (субъектный) уровни стратегического развития образования, а также не противоречить инициативам головного вуза в данном направлении. Недостаточный учет особенностей и закономерностей вышестоящих звеньев системы влечет неактуальность и неэффективность каждой нижестоящей стратегии, снижается ее ценность и прикладное значение.

ВИТИ НИЯУ МИФИ транслирует на территории региона интересы НИЯУ МИФИ как стратегического партнера ГК «Росатом» в сфере подготовки кадров. В Стратегии ГК «Росатом» зафиксировано, что деятельность этой Госкорпорации на  $\frac{2}{3}$  связана с внешними рынками. ГК «Росатом» позиционируется как глобальная корпорация, и задача НИЯУ МИФИ – обеспечить кадровое сопровождение всех её проектов, без исключения. Проекты эти разноуровневые: проектирование объектов (атомных станций, центров ядерной науки и технологий), различных сложных установок, например, опреснительных, основанных на использовании атомной энергии, и прочего. Этим определяется линейка необходимых кадров, которые должны быть профессионально подготовлены. [8]

В работе НИЯУ МИФИ и его филиалов (в том числе филиала, расположенного в городе Волгодонске) по кадровому обеспечению ГК «Росатом» большое количество разветвлений. Во-первых, вуз готовит российские кадры, которые будут работать на зарубежных объектах. Во-вторых, в системе НИЯУ МИФИ сейчас много филиалов в городах присутствия госкорпорации. Обычно это маленькие города, но именно там готовят людей, которые будут работать линейными инженерами. Всю эту линейку специалистов готовит большой регионально-распределённый университет НИЯУ МИФИ.

Но Институт призван удовлетворять не только кадровые потребности атомной отрасли, но и потребности личности, общества в качественном образовании, знаниях, результатах научно-технической деятельности и инновациях, эффективной подготовке отвечающих высоким профессиональным и этическим требованиям специалистов.

Стратегия развития ВИТИ НИЯУ МИФИ направлена на сохранение и приумножение достигнутых результатов с учетом современных трендов развития образования и устанавливает ключевые цели, задачи, конкретные направления, механизмы, обеспечивающие дальнейшее развитие института на современном этапе функционирования системы высшего образования. Стратегия разработана в соответствии с принципами системности и сбалансированности ключевых показателей деятельности института. В Стратегии ВИТИ НИЯУ МИФИ на 2022-2030 гг. определены [9]:

- стратегические ориентиры развития института (его миссия, цель и задачи по приоритетным стратегически значимым направлениям деятельности) с учетом трендов современного образования и основных вызовов предстоящего периода;
- целевая модель института, ориентированная на его опережающее развитие как образовательной организации, обеспечивающей подготовку высококвалифицированных кадров для атомной отрасли;
- возможные ограничения и вызовы реализации стратегии и пути их преодоления или снижения;
- целевые индикаторы и показатели по стратегически значимым направлениям деятельности института.

Для закрепления статуса Института как структурного подразделения НИЯУ МИФИ, нацеленного на развитие высоких технологий и внедрение промышленных инноваций, трендсеттера по подготовке инженерных кадров новой формации, задачами ВИТИ НИЯУ МИФИ становятся:

- учет технологических и экономических трендов и запросов работодателей, на основе мониторинга профессий будущего;
- координация образовательной деятельности с работодателями;
- формирование образовательной модели, учитывающей специфику работы атомной и других высокотехнологичных отраслей;
- развитие системы мониторинга трудоустройства выпускников;
- популяризация инженерных профессий среди абитуриентов.

При разработке Стратегии развития ВИТИ НИЯУ МИФИ были учтены следующие основные изменения в системе высшего образования и секторе исследований и разработок в условиях перехода к модели экономики знаний [10]:

1. Высшее образование стало массовым, вузы готовят специалистов для всех секторов экономики, а не только для научной деятельности и преподавания в высшей школе. Это изменяет требования к уровню и содержанию основных профессиональных модулей, заставляет перейти от «знаниевой» модели к «компетентностной», с одновременным повышением требований к уровню надпрофессиональных компетенций.

2. Изменяется структура высшего образования. Для большинства направлений подготовки сокращается срок обучения по программам высшего образования (бакалавриат); магистратура остается востребованной в основном по направлениям, связанным с дальнейшей научной и исследовательской деятельностью; активно развивается система дополнительного образования, включая переориентацию значительной части магистерских программ в эту область.

3. В образовательный процесс активно внедряются новые технологии, в первую очередь, информационные и цифровые технологии, развиваются модели дистанционного образования, это существенно трансформирует существующий образовательный процесс, формирует новый педагогический дизайн. Образование

становится непрерывным процессом для человека на протяжении большей части его жизни.

4. Научно-исследовательская деятельность переходит на рыночные принципы. Во-первых, все виды финансирования требуют активной конкурентной борьбы, во-вторых, коммерческий или некоммерческий формат исследований определяется личной мотивацией ученого – желанием публикаций статей или патентованием и дальнейшей коммерциализацией.

5. Инженерно-конструкторские, технологические исследования и разработки проводятся в условиях постоянной конкуренции и существенной интенсификации деятельности. Постоянная конкуренция вынуждает бороться за лидерские позиции, что уже невозможно без создания профильных коммерческих структур или очень тесного взаимодействия с рыночными партнерами.

6. Институт становится реальным игроком в части комплексного пространственного развития города Волгодонска и региона.

В условиях существующих и потенциальных вызовов и угроз для российской науки и образования при определении направлений Стратегии развития ВИТИ НИЯУ МИФИ в основу была положена Программа «Приоритет – 2030» (утверждена Распоряжением Правительства РФ от 31.12.2020 № 3697-р). В ней, в частности, определены направления деятельности и ресурсы для обеспечения вклада института в достижение национальных целей развития РФ на период до 2030 года, а также для решения тех задач, которые ставит перед институтом НИЯУ МИФИ. Кроме того, в Стратегии развития обозначена степень участия ВИТИ НИЯУ МИФИ в социально-экономическом развитии города Волгодонска, Волгодонской агломерации и в целом Ростовской области.

В ходе реализации Стратегии ниже перечисленные слабые стороны ВИТИ НИЯУ МИФИ (часть из них обусловлена угрозами, поступающими из внешней среды) необходимо преодолеть и в перспективе рассматривать их уже как зоны развития:

- несбалансированность педагогических работников по профессиональным качествам и возрастным показателям, нехватка молодых высококвалифицированных кадров затрудняет модернизацию научно-образовательной сферы и активизацию инновационной деятельности;

- недостаточный уровень языковой подготовки части педагогических работников;

- недостаточно высокий уровень подготовки школьников для освоения образовательных программ ВО и СПО профильных для атомной отрасли;

- материальная, информационная и научно-исследовательская база требует дополнительных ресурсов для развития с целью решения задач предприятий-партнеров;

- высокий уровень требований к выпускникам со стороны отраслевых предприятий;

- недобросовестная конкуренция со стороны вузов региона.

Деятельность Института по реализации Стратегии развития будет направлена на достижение стратегической цели ВИТИ НИЯУ МИФИ на международном, национальном, региональном уровнях. Достижение задач отраслевого развития предусмотрено на каждом из обозначенных уровней.

На международном уровне:

- развитие и продвижение российского ядерного образования, российских атомных технологий, науки и культуры в странах-партнерах ГК «Росатом»;

- включенность в глобальный рынок образовательных услуг через развитие регионально-распределенного проекта – Ресурсного центра ГК «Росатом» – НИЯУ МИФИ в г. Волгодонске;

- содействие выполнению обязательств ГК «Росатом» в области обучения иностранных граждан;
- формирование и развитие конкурентоспособной системы экспорта образовательных программ сферы ядерной энергетики;
- расширение международного и межрегионального сотрудничества в области ядерного образования;
- обучение в Ресурсном центре специалистов зарубежных организаций, которые будут способствовать продвижению отечественных ядерных технологий на мировой рынок;
- содействие повышению конкурентоспособности российских вузов на международных энергетических и других высокотехнологичных рынках.

На национальном уровне:

- сотрудничество ВИТИ НИЯУ МИФИ с электроэнергетическим, машиностроительным, инжиниринговым и дивизионом по реализации программ в новой энергетике (ветроэнергетическим) ГК «Росатом» в области науки, инноваций и образования;
- расширение спектра направлений подготовки кадров в интересах ГК «Росатом», создание сетевых и программ дополнительного профессионального образования в интересах предприятий атомной отрасли;
- совершенствование системы прикладных исследований в интересах предприятий-партнеров ВИТИ НИЯУ МИФИ, на основе интеграции науки, образования и предприятий атомной отрасли для реализации полного цикла строительства, производства, монтажа и эксплуатации оборудования АЭС;
- поддержание безопасности и эксплуатационной надежности ядерных энергетических установок посредством внедрения в эксплуатационную практику ядерных энергетических объектов цифровых, информационных и ремонтных технологий, а также современных методов и средств оперативной технической диагностики;
- создание и развитие центра подготовки эксплуатационного персонала АЭС с реакторами ВВЭР и кадров для атомного машиностроения;
- разработка и внедрение в образовательный процесс моделей, обеспечивающих цифровую трансформацию и расширение возможностей практико-ориентированной подготовки;
- привлечение талантливой молодежи в Институт и обеспечение последующего «бесшовного» трудоустройства выпускников на предприятия ГК «Росатом».

На региональном уровне:

- укрепление позиции Института в области качественной подготовки специалистов для атомной энергетики, обеспечение высокого качества многоуровневой подготовки кадров на основе практико-ориентированного подхода;
- обеспечение адекватной реакции на текущие и перспективные потребности ГК «Росатом» и региональной экономики;
- развитие педагогического потенциала школ города и региона, реализация новых образовательных программ по педагогическим направлениям подготовки;
- совершенствование системы довузовской подготовки путем применения проектных и адаптивных форм работы со школьниками, интеграция в систему новых активностей, связанных с набором абитуриентов (Инженерная смена Юниоры AtomSkills, летняя школа «Юные атомщики», атомклассы, AtomCamp, Яндекс-лицей; физико-математическая школа и др.) на инновационных площадках (Атомный технопарк) [11].

В части механизмов участия в реализации национальных целей ВИТИ НИЯУ МИФИ определяет свои профессиональные задачи следующим образом:

- обеспечение доступа к качественному высшему образованию, развитие инновационного и социального потенциала регионов и отраслей за счет интеграции с региональными органами власти и организациями высшего образования региона;
- модернизация профессионального образования, в том числе посредством внедрения адаптивных, практико-ориентированных и гибких образовательных программ;
- создание новых программ практико-ориентированного и дуального обучения, интеграция образовательного процесса в реальную деятельность (бесшовная адаптация);
- обеспечение подготовки высококвалифицированных кадров для цифровой экономики;
- участие в формировании современной и безопасной цифровой образовательной среды для обучающихся образовательных организаций всех видов и уровней города Волгодонска и Ростовской области;
- участие в формировании системы раннего выявления, поддержки и развития способностей детей и молодежи в естественно-научных и инженерно-технических областях, формировании развивающей среды для будущих инженеров;
- организация на базе факультета повышения квалификации Института переподготовки специалистов высокотехнологичных и наукоемких предприятий и организаций ГК «Росатом» и других партнеров ВИТИ НИЯУ МИФИ;
- создание системы непрерывного образования и ДПО, обеспечивающей сквозное обучение на всем цикле профессионального развития;
- изменение позиции ВИТИ НИЯУ МИФИ на территории, реализация задачи – стать драйвером социально-экономического развития г. Волгодонска и Волгодонской агломерации;
- обеспечение информационной и кадровой поддержки местных учреждений культуры, культурно-досуговых учреждений г. Волгодонска и Ростовской области в части проведения просветительских мероприятий научно-популярной тематики.

ВИТИ НИЯУ МИФИ ставит перед собой задачу дальнейшего развития Ростовской области как центра науки, инноваций, образования, развития социальной и культурной сферы, обеспечения ядерной, радиационной и экологической безопасности не только данной территории, а также Южного и Северо-Кавказского федеральных округов.

Решение поставленных задач развития будет осуществляться за счет стратегических направлений деятельности Института, включающих:

1. Обеспечение кадрового потенциала отрасли:
  - гибкая адаптация образовательных программ и открытие новых направлений подготовки под новые бизнесы ГК «Росатом»;
  - независимая оценка квалификации и сертификации выпускников;
  - развитие международного Ресурсного центра ГК «Росатом» – НИЯУ МИФИ для практико-ориентированной подготовки иностранных и российских студентов НИЯУ МИФИ и консорциума опорных вузов ГК «Росатом»;
  - раскрытие потенциала студентов через участие в профессиональных и карьерных мероприятиях;
  - развитие системы отбора и привлечения талантливой молодежи в атомную отрасль.
2. Прикладные научные исследования в интересах ГК «Росатом»:
  - разработка современных систем диагностики и мониторинга оборудования и систем с использованием цифровых технологий;
  - диагностический мониторинг оборудования АЭС и оценка его остаточного ресурса;

- разработка виртуальных тренажеров для повышения качества подготовки специалистов атомной отрасли;
- создание Центра компетенций в области производственных технологий в машиностроении с образцовой образовательной фабрикой (Learning Factory).

### 3. Цифровая трансформация:

- создание Центра цифровых компетенций и трансфера инновационных проектов в образовании;
- персонализация и адаптивность программ обучения за счет внедрения образовательных ИТ;
- формирование единого безопасного информационного пространства.

4. Интеграция в социально-экономическое развитие Волгодонской агломерации воспроизводства и эффективного использования интеллектуального потенциала территории для повышения качества жизни. [12]

Стоит отметить, что Стратегия ВИТИ НИЯУ МИФИ ориентируется не только на сегодняшние потребности и запросы государства и бизнеса, но и учитывает опережающее развитие в условиях турбулентной среды. Это развитие будет построено на эффективном взаимодействии между человеком и созданными цифровыми технологиями. В этой связи для достижения стратегической цели развития в рамках Национальной программы «Цифровая экономика РФ» определены следующие задачи Института:

- проведение общего анализа «цифровой зрелости» Института на основе методики Министерства науки и высшего образования РФ;
- обучение участников процесса цифровой трансформации, расширение числа носителей цифровых компетенций, информационное продвижение цифровой культуры Института;
- формирование единой цифровой платформы управления сервисами и услугами Института, позволяющей структурировать данные из различных источников, предоставлять результат оказания услуги или сервиса преимущественно в электронном виде;
- интеграция цифровой платформы Института с НИЯУ МИФИ;
- обеспечение взаимодействия между собой различных информационных систем Института для отказа от дублирования и множественного ввода однотипных данных;
- обеспечение оперативного поступления данных необходимого уровня качества в информационные системы Института, в том числе в режиме реального времени;
- формирование у 100% обучающихся, АУП и НПР цифровых компетенций и их актуализация в соответствии с уровнем развития информационных технологий.

Трансформация процессов Института будет осуществляться в четырех направлениях: образование, исследования, управление и материально-техническое оснащение [13].

1. В области образования будут реализованы следующие аспекты цифровой трансформации:

- формирование единого информационного образовательного пространства;
- система планирования и разработки индивидуальной траектории обучения на основе сбора и анализа цифрового следа обучающегося;
- цифровая трансформация процессов профориентации и трудоустройства;
- разработка и реализация курсов дополнительного профессионального образования по формированию цифровых компетенций;
- цифровая библиотека – единое автоматизированное библиотечное пространство с предоставлением доступа ко всем необходимым библиотечным ресурсам для всех студентов и преподавателей с любого персонального устройства;
- актуализация использования цифровых образовательных инструментов;

– расширение использования в образовательном процессе 3D моделей основного технологического оборудования и систем;

2. В области исследований – формирование сервисной платформы научных разработок.

3. В области управления Институтом будет продолжена комплексная цифровизация бизнес-процессов. Будут построены (актуализированы) информационные модели взаимодействия структурных подразделений с целью повышения качества и минимизации времени на управленческие решения. Получит продолжение развитие цифровой инфраструктуры посредством обновления технических средств и программного обеспечения, модернизации и расширения проводных и беспроводных сетей. Скоростной доступ к информационным ресурсам и сервисам будет обеспечен из любой точки Института с учетом обеспечения мер информационной безопасности.

4. В области материально-технического оснащения:

– опережающее развитие и модернизация лабораторной базы и IT-инфраструктуры с приоритетом внедрения новых технологий;

– использование ресурсов предприятий для практической подготовки обучающихся.

Выполнение заявленной в Стратегии развития Миссии Института и достижение поставленной стратегической цели и основных задач развития в значительной степени определяется состоянием материально-технической базы Института и, прежде всего, обеспеченностью и уровнем оснащения лабораторий необходимым оборудованием, его обновлением, наличием объектов социально-культурной инфраструктуры, используемых в социально-воспитательной работе.

В связи с этим, Институт, в рамках реализации Стратегии, определяет для себя следующую цель: системное обновление и модернизация материально-технической базы, обеспечивающее реализацию современных образовательных, воспитательных и научно-исследовательских технологий.

Основными задачами управления имущественным комплексом ВИТИ НИЯУ МИФИ являются:

1. Развитие инфраструктуры Института:

– создание современной и комфортной социальной среды для жизни и реализации творческого потенциала сотрудников и обучающихся ВИТИ НИЯУ МИФИ, в том числе лиц с ограниченными возможностями здоровья;

– развитие инновационной инфраструктуры для организации образовательного процесса, проведения исследований и разработок;

– модернизация общежитий для обеспечения комфортного проживания обучающихся, в том числе иностранных граждан;

– формирование и выполнение программы модернизации аудиторного фонда Института с целью обеспечения возможности применения современных образовательных технологий.

2. Повышение уровня предоставляемых образовательных услуг, через обеспечение качества бытовых условий проживания в общежитиях, занятий физической культурой и спортом, санитарно-гигиенического и эстетического состояния аудиторий, лабораторий, мест общего пользования

3. Повышение уровня обеспечения безопасности:

– устройство проходных оборудованных системами контроля и управления доступа, металлодетекторами;

– капитальный ремонт систем видеонаблюдения корпусов Института и общежитий;

– создание единого пульта управления системами безопасности и оповещения о чрезвычайных ситуациях. [14]

Резюмируя можно сделать вывод, что стратегические инициативы ВИТИ НИЯУ МИФИ играют немалую роль в реализации сервисно-инфраструктурной модели развития города Волгодонска, как территории присутствия предприятий ГК «Росатом». Для закрепления статуса Института как структурного подразделения Национального исследовательского ядерного университета, нацеленного на развитие высоких технологий и внедрение промышленных инноваций, трендсеттера по подготовке инженерных кадров новой формации, задачами ВИТИ НИЯУ МИФИ становятся: учет технологических и экономических трендов и запросов работодателей, на основе мониторинга профессий будущего; координация образовательной деятельности с работодателями; формирование образовательной модели, учитывающей специфику работы атомной и других высокотехнологичных отраслей; развитие системы мониторинга трудоустройства выпускников; популяризация инженерных профессий среди абитуриентов [15]. При разработке Стратегии развития ВИТИ НИЯУ МИФИ учитываются основные изменения в системе высшего образования и секторе исследований и разработок в условиях перехода к модели экономики знаний. Определение Миссии, стратегической цели и целевой модели развития ВИТИ НИЯУ МИФИ, направлений развития, потенциальных «точек роста», основано также на анализе основных ресурсов и оценке потенциала города, внешних и внутренних факторов, местных особенностей, возможного вектора включения Института в процессы сервисно-инфраструктурного развития города и региона.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. АСИ и Росатом разрабатывают новый подход к развитию городов // Сайт Агентства стратегических инициатив. – URL: <https://asi.ru/news/186768/> (дата обращения: 13.10.2022).
2. Главы территорий расположения АЭС, представители атомных станций и эксперты Фонда «АТР АЭС» обсудили новые подходы к развитию территорий на VI Форуме городов: новости отрасли. – URL : <https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/novosti-otrasli/41517/> (дата обращения: 10.10.2022).
3. Коновалова, Т.А. Повышение эффективности экономического развития моногорода стратегического значения : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Т.А. Коновалова. – Санкт-Петербург, 2013. – 24 с. – URL : <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-ekonomicheskogo-razvitiyamonogoroda-strategicheskogo-znacheniya> (дата обращения: 03.10.2022).
4. Методические рекомендации по подготовке стратегий развития отраслей экономики / Министерство экономического развития Российской Федерации [https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/metodicheskie\\_rekomendacii\\_po\\_podgotovke\\_strategiy\\_razvitiya\\_otrasley\\_ekonomiki.html](https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/metodicheskie_rekomendacii_po_podgotovke_strategiy_razvitiya_otrasley_ekonomiki.html) (дата обращения: 03.10.2022).
5. Уланова, Г.В. Университет как драйвер экономического и социального развития региона (на примере Республики Калмыкия) / Г.В. Уланова // Новые технологии. – 2018. – № 1. – URL : <https://newtechology.mkgtu.ru/jour/article/view/114/114> (дата обращения: 15.10.2022).
6. Чернышева, Т.Л. Университет как драйвер развития города / Т.Л. Чернышева // Научно-педагогическое обозрение. – 2017. – № 2. – С. 209-219. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/universitet-kak-drayver-razvitiya-goroda-t-l/viewer> (дата обращения: 12.10.2022).
7. Стратегия социально-экономического развития города Волгодонска до 2030 года // Сайт Администрации города Волгодонска. – URL : <http://volgodonskgorod.ru/investments/strategicheskoe-planirovanie/> (дата обращения: 12.10.2022).
8. Руденко, В.А. Выстраивание партнерских отношений атомной отрасли с общественностью: история вопроса и перспективы развития / В.А. Руденко, Т.С. Попова, Ю.А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 2(35). – С. 131-141. – EDN WMRFMV.
9. Мукин, В.А. Концепция оптимизации регионального университета / В.А. Мукин, О.Ю. Ефремов // Современное образование. – 2018. – № 1. – С. 11-21. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-optimizatsii-regionalnogo-universiteta> (дата обращения: 12.10.2022).
10. Грабельных, Т.И. Роль университета в развитии системы региональных взаимодействий: от универсальной научно-образовательной к экспертно-технологической модели / Т.И. Грабельных, Е.В. Лесниковская // Вестник университета. – 2017. – № 3. – С. 220-222. – URL : [https://vestnik.guu.ru/jour/article/view/665?locale=ru\\_RU](https://vestnik.guu.ru/jour/article/view/665?locale=ru_RU) (дата обращения: 12.10.2022).

11. Руденко, В.А. Инновационная модель профориентационной кооперации стейкхолдеров атомной отрасли на базе Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» / В.А. Руденко, С.А. Томилин, А.В. Железнякова, Н.И. Лобковская // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 3(44). – С. 73-85. – <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-07>.
12. Заусаева, Я.Д. Атомные специалисты в структуре местных сообществ городов-спутников АЭС : Итоговый отчет о целевом использовании пожертвования / Я.Д. Заусаева. – Москва : Фонд поддержки социальных исследований «Хамовники», 2015. – 69 с. – URL : <https://khamovniki.ru/wp-content/uploads/6c372f58fd2d1a32f1a00102821c5e0b.pdf> (дата обращения: 13.10.2022).
13. Лазаренко, В.А. Социальное развитие городов атомной электроэнергетики России / В. А. Лазаренко // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – № 2. – С. 20-30. – URL : <https://journals.eco-vector.com/2587-5566/article/view/12671>
14. Калмыкова, Д.С. Экологическая безопасность атомной промышленности / Д. С. Калмыкова // Региональное развитие: экономика и социум. Взгляд молодых исследователей : Материалы симпозиума в рамках XVII (XLIX) Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Образование, наука, инновации – вклад молодых исследователей», Кемерово, 19–30 апреля 2022 года. Выпуск 23. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. – С. 65-68. – EDN BLOEJC.
15. Руденко, В.А. Профориентационная кооперация стейкхолдеров атомной отрасли / В.А. Руденко, С.А. Томилин, А.В. Железнякова, Н.И. Лобковская // Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XVIII Международной научнопрактической конференции, 19 – 20 мая 2022 г. / НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск : ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2022. – С. 82-84.

## REFERENCES

- [1] ASI i Rosatom razrabatyvayut novyj podhod k razvitiyu gorodov [SIA and Rosatom Develop a New Approach to Urban Development] Sajt Agentstva strategicheskikh iniciativ [Strategic Initiative Agency website], <https://asi.ru/news/186768/> (accessed 13.10.2022) (in Russian).
- [2] Glavy territorij raspolozheniya AES, predstaviteli atomnyh stancij i eksperty Fonda "ATR AES" obsudili novye podhody k razvitiyu territorij na VI Forume gorodov: novosti otrasli [Heads of NPP Host Territories, Representatives of Nuclear Power Plants and Experts from the NPP Asia-Pacific Foundation Discussed New Approaches to Territorial Development at the VI Urban Forum: Industry News], <https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/novosti-otrasli/41517/> (accessed 10.10.2022) (in Russian).
- [3] Konovalova T.A. Povyshenie effektivnosti ekonomicheskogo razvitiya monogoroda strategicheskogo znacheniya: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ekonomicheskikh nauk [Improving the Efficiency of Economic Development in a Strategic Single-Industry Town: PhD thesis abstract in economics]. St. Petersburg. 2013. 24 p., <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-ekonomicheskogo-razvitiyamonogoroda-strategicheskogo-znacheniya> (accessed 03.10.2022) (in Russian).
- [4] Metodicheskiye rekomendatsii po podgotovke strategiy razvitiya otrasley ekonomiki [Guidelines for the preparation of strategies for the development of sectors of the economy], Ministerstvo ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii [Ministry of Economic Development of the Russian Federation], [https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/metodicheskie\\_rekomendacii\\_po\\_podgotovke\\_strategiy\\_razvitiya\\_otrasley\\_ekonomiki.html](https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/metodicheskie_rekomendacii_po_podgotovke_strategiy_razvitiya_otrasley_ekonomiki.html) (accessed 03.10.2022) (in Russian).
- [5] Ulanova G.V. Universitet kak drayver ekonomicheskogo i social'nogo razvitiya regiona (na primere Respubliki Kalmykiya) [The University as a Driver of Regional Economic and Social Development (Case Study of the Republic of Kalmykia)], Novye tekhnologii [New technologies], 2018, no. 1, <https://newtechology.mkgtu.ru/jour/article/view/114/114> (accessed 15.10.2022) (in Russian).
- [6] Chernysheva T.L. Universitet kak drayver razvitiya goroda [University as a Driver of Urban Development], Nauchno-pedagogicheskoe obozrenie [Pedagogical Review], 2017, no. 2, pp. 209-219, <https://cyberleninka.ru/article/n/universitet-kak-drayver-razvitiya-goroda-t-l/viewer> (accessed 12.10.2022) (in Russian).
- [7] Strategiya social'no-ekonomicheskogo razvitiya goroda Volgodonska do 2030 goda [Volgodonsk Socio-Economic Development Strategy until 2030], Sajt Administracii goroda Volgodonska [Volgodonsk City Administration website], <http://volgodonskgorod.ru/investments/strategicheskoe-planirovanie/> (accessed 12.10.2022) (in Russian).
- [8] Rudenko V.A. Vystraivanie partnerskih otnoshenij atomnoj otrasli s obshchestvennost'yu: istoriya voprosa i perspektivy razvitiya [Building Nuclear Public Partnerships: Background and

- Perspectives] *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global Nuclear Safety], 2020, no. 2(35), pp. 131-141, EDN WMRFMV (in Russian).
- [9] Mukin V.A., Efremov O.Yu. *Koncepciya optimizatsii regional'nogo universiteta* [Concept of Optimising a Regional University], *Sovremennoe obrazovanie* [Modern Education], 2018, no. 1, pp. 11-21, <https://cyberleninka.ru/article/n/kontsepsiya-optimizatsii-regionalnogo-universiteta> (accessed 12.10.2022) (in Russian).
- [10] Grabel'nyh T.I., Lesnikovskaya E.V. *Rol' universiteta v razvitii sistemy regional'nyh vzaimodejstvij: ot universal'noj nauchno-obrazovatel'noj k ekspertno-tekhnologicheskoy modeli* [Role of University in Developing a System of Regional Interactions: from a Universal Science-Education to an Expert-Technology Model], *Vestnik universiteta* [University Press], 2017, no.3, pp. 220-222, [https://vestnik.guu.ru/jour/article/view/665?locale=ru\\_RU](https://vestnik.guu.ru/jour/article/view/665?locale=ru_RU) (accessed 12.10.2022) (in Russian).
- [11] Rudenko V.A., Tomilin S.A., Zheleznyakova A.V., Lobkovskaya N.I. *Innovatsionnaya model' proforiyentsionnoy kooperatsii steykholderov atomnoy otrasli na baze Volgodonskogo inzhenerno-tekhnicheskogo instituta – filiala Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»* [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'naya yadernaya bezopasnost'* [Global nuclear safety], 2022, vol. 3(44), pp. 73-85, <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-07> (in Russian).
- [12] Zausaeva YA.D. *Atomnye specialisty v strukture mestnyh soobshchestv gorodov-sputnikov AES: Itogovyj otchet o celevom ispol'zovanii pozhertvovaniya* [Nuclear Professionals in the Structure of Local Communities of the NPP Satellite Cities: Final Report on the Intended Use of the Donation]. Moskva: Fond podderzhki social'nyh issledovaniy «Hamovniki» [Moscow: Khamovniki Social Research Support Foundation], 2015, 69 p., <https://khamovniki.ru/wp-content/uploads/6c372f58fd2d1a32f1a00102821c5e0b.pdf> (accessed 13.10.2022) (in Russian).
- [13] Lazarenko V.A. *Social'noe razvitie gorodov atomnoj elektroenergetiki Rossii* [Social Development of Nuclear Power Cities in Russia], *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series], 2019, no. 2, pp. 20-30, <https://journals.eco-vector.com/2587-5566/article/view/12671> (in Russian).
- [14] Kalmykova D.S. *Ekologicheskaya bezopasnost' atomnoj promyshlennosti* [Environmental Safety of the Nuclear Industry], *Regional'noe razvitie: ekonomika i socium. Vzgl'yad molodyh issledovatelej: Materialy simpoziuma v ramkah XVII (XLIX) Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh «Obrazovanie, nauka, innovacii – vklad molodyh issledovatelej»*, Kemerovo, 19–30 aprelya 2022 goda. Vypusk 23 [Regional Development: Economy and Society. View of Young Researchers: Proceedings of the Symposium at the XVII (XLIX) International Scientific Conference of Students and Young Scientists «Education, Science, Innovation - the Contribution of Young Researchers», Kemerovo, April 19-30, 2022. Issue 23]. Kemerovo: Kemerovskij gosudarstvennyj universitet [Kemerovo: Kemerovo State University], 2022, pp. 65-68, EDN BLOEJC (in Russian).
- [15] Rudenko V.A., Tomilin S.A., Zheleznyakova A.V., Lobkovskaya N.I. *Proforiyentsionnaya kooperatsiya steykholderov atomnoy otrasli* [Career guidance cooperation of nuclear industry stakeholders], *Bezopasnost' yadernoy energetiki: tezisy dokladov XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoprakticheskoy konferentsii, 19 – 20 maya 2022 g., NIYAU MIFI (i dr.)* [Safety of nuclear energy: abstracts of the XVIII International Scientific and Practical Conference, May 19-20, 2022, NRNU MEPhI (and others)]. Volgodonsk: VETI NRNU MEPhI, 2022. pp. 82-84 (in Russian).

### **Role of University Strategic Initiatives in Service and Infrastructure Model to Develop the City of State Corporation «Rosatom» Presence Using VETI NRNU MEPhI as an Example**

**Valentina A. Rudenko<sup>1</sup>, Natalia F. Privalova<sup>2</sup>,  
Sergey A. Tomilin<sup>3</sup>, Tatiana S. Popova<sup>4</sup>**

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

<sup>1</sup> *VARudenko@mephi.ru; ORCID iD: 0000-0002-6698-5469; WoS Researcher ID: B-7730-2016*

<sup>2</sup> *NFPrivalova@mephi.ru; ORCID iD: 0000-0002-6464-188*

<sup>3</sup> *SATomilin@mephi.ru; ORCID iD: 0000-0001-8661-8386; WoS Researcher ID: G-3465-2017*

<sup>4</sup> *TSPopova@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0002-0554-2672*

*Received by the editorial office on 09/09/2022*

*After revision on 11/15/2022*

*Accepted for publication on 11/21/2022*

*Abstract.* The paper considers the model of service and infrastructure development of the city of Volgodonsk which is based on the approach that takes into account the existing potential in the territory of the urban agglomeration and is aimed at a more intensive use of available opportunities. As a result of the implementation of the Strategy of its socio-economic development until 2030, the city of Volgodonsk should become a city of scientific and technical intellectuals. And an important role in achieving this mission is assigned to the Volgodonsk Engineering and Technical Institute (branch of MEPhI). This university is considered as a driver of "intellectual prosperity" of the Rostov NPP location. VITI MEPhI translates in the region the interests of MEPhI as a strategic partner of SC "Rosatom" in the field of personnel training. The development strategy of VITI MEPhI is aimed at preservation and multiplication of the achieved results taking into account modern trends of education development and establishes key objectives, tasks, specific directions, mechanisms ensuring further development of the Institute at the present stage of functioning of the system of higher professional education.

*Keywords:* Volgodonsk Engineering Technical Institute, higher education development drivers, nuclear industry, energy complex, NPP site, socio-economic development of the region, infrastructure projects, infrastructure-service approach, educational organization, educational process, university development strategy.

*For citation:* Rudenko V.A., Privalova N.F., Tomilin S.A., Popova T.S. Role of VETI NRNU MEPhI Strategic Initiatives in Service and Infrastructure Model to Develop the City of State Corporation Rosatom Presence // Global Nuclear Safety. 2022. No.4(45). P. 101-116 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-10>

**AUTHOR INDEX**

<i>Bogdanova E.V.</i>	24
<i>Dementyev S.S.</i>	40
<i>Dikarev P.V.</i>	40
<i>Gorskaya O.I.</i>	6
<i>Gubeladze A.R.</i>	15
<i>Gubeladze O.A.</i>	15
<i>Korbut T.N.</i>	79
<i>Krasnokutsky V.V.</i>	61
<i>Kravets S.B.</i>	61
<i>Kuzin S.A.</i>	61
<i>Kuzmin A.V.</i>	79
<i>Kuzmuk D.A.</i>	79
<i>Lyskova I.E.</i>	87
<i>Malkawi R.T.Al.</i>	69
<i>Nautsyk O.A.</i>	79
<i>Parygin E.V.</i>	61
<i>Popova T.S.</i>	101
<i>Privalova N.F.</i>	101
<i>Rahman A.S.K.</i>	54
<i>Rudenko V.A.</i>	101
<i>Shilin A.N.</i>	40
<i>Tikhomirov G.V.</i>	25
<i>Tomilin S.A.</i>	101
<i>Uvakin M.A.</i>	54
<i>Zaidan L.J.</i>	69

**АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ**

Богданова Е.В.	25
Горская О.И.	6
Губеладзе А.Р.	15
Губеладзе О.А.	15
Дементьев С.С.	40
Дикарев П.В.	40
Зайдан Л.Д.	69
Корбут Т.Н.	79
Кравец С.Б.	61
Краснокутский В.В.	61
Кузин С.А.	61
Кузьмин А.В.	79
Кузьмук Д.А.	79
Лыскова И.Е.	87
Малкави Р.Т.А.	69
Науцик О.А.	79
Парыгин Е.В.	61
Попова Т.С.	101
Привалова Н.Ф.	101
Рахман А.С.К.	54
Руденко В.А.	101
Тихомиров Г.В.	25
Томилин С.А.	101
Увакин М.А.	54
Шилин А.Н.	40

## NOTES FOR AUTHORS

The full text of article intended for publication should be signed by authors, it has to be followed by a certificate of material verification through the anti-plagiarism program (permissible borrowing and self-citation - no more than 20%), an application from the institution in which the work was performed, and an expert resolution on publication possibility.

One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title in Russian and English;
- the structured abstract (200-250 words) in Russian and English;
- keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- the list of references in Russian and English;
- information about the authors in Russian and English (a surname, a name, a middle name, a work place, a position, an academic degree, a rank and E-mail address, contact phone number);
- ORCID и Researcher ID index of each author (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>).

The article should be structured: introduction (review of problems, objective of work); theory of the issue; a detailed presentation of the methods of conducting experiments, a description of materials and methods of analysis, statistical processing is desirable; the discussion of the results; conclusion. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The article should contain only the most necessary formulas, it is desirable to abandon the intermediate calculations. The equation editor of Equation 3.0 is recommended to record the 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. Inclusion of tables in the article should be appropriate. Tables should be numbered and headings in Russian and English (10 pf). It is desirable that the tables do not exceed one page of text. Figures should be clear when printing in black and white, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions. The units of measurement should be given in accordance with the International System (SI).

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Please do not use signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article has to be no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (12-20 sources). If the text of the article is less than 2500 type characters, it may not be considered.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of foreign countries, Russia and the CIS on the subject matter in the articles. The bibliography should be in accordance with State Standard Specification (GOST) 7.0.100-2018 «Bibliographic Record and Bibliographic Description. General Requirements and Drafting rules». References should include at least 12 sources (no more than 3 references to your own articles). There should be obligatory at least 5 sources later than 2016, and at least 4 references to foreign studies of recent years (from foreign countries, outside the former USSR). References are given at the end of article in order they mentioned. References are highlighted with square brackets. References to foreign sources are given in the original language and are accompanied, in case of translation into Russian, with indication of the translation. Textbooks, reference books, guidelines and recommendations are not included in the list of references. References are provided separately (see the guidelines in

«The List of References Standard in English»). The bibliography in English should be issued according to Scopus standard specification. Indicate article DOI if it in the presence.

You should post an article on the elpub platform <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> and provide the following materials by e-mail [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru) in order your article to be accepted in the journal:

- an article file in Word format;
- the same file in pdf format signed by the author;
- a certificate of material verification for anti-plagiarism
- an application from the institution where the work is made;
- an expert resolution on publication possibility.

#### THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH

##### *For journals:*

- [1] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie sredy deystviya v sisteme proektirovaniya tehnologii demontazha oborudovaniya pri vyvode iz ekspluatatsii bloka AES [The analysis and representation of the action environment in system of technology design of equipment dismantle during NPP unit taking out of operation], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global nuclear safety], 2014, no. 1(10), pp. 25-31 (in Russian).
- [2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul'tury` bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of a Future Nuclear Specialist], Sovremennoe obrazovanie [Modern Education], 2017, no. 1, pp. 32-38, [http://e-notabene.ru/pp/article\\_22498.html](http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html) (in Russian).

##### *For books:*

- [3] Mogilev V.A., Novikov S.A. Faykov Yu.I. Tekhnika vzryvnogo eksperimenta dlya issledovaniya mekhanicheskoy stoykosti konstruksiy. [Explosive experiment techniques for research of mechanical firmness of designs]. Sarov, FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics], 2007, 215 p. (in Russian).

##### *For web-resources:*

- [4] Strategia razvitiya transportnogo kompleksa Rostovskoy oblasti do 2030 goda [Development strategy of a transport complex of the Rostov region till 2030]. Officialnij sait Ministerstva transporta Rostovskoy oblasti [Official site of the Transport Ministry of Rostov region], 2015, <http://mindortrans.donland.ru/Default.aspx?pageid=107384> (in Russian).

##### *For foreign references:*

- [5] Gulyaev M., Bogorovskaia S., Shapkina T. The Atmospheric air condition in Rostov Oblast and its effect on the population health // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. CA. USA. B&M Publishing. 2014. P. 56-60.

##### *For materials of conferences:*

- [6] Gerasimov S.I., Kuzmin V.A. Issledovaniye osobennostey initsirovaniya svetochuvstvitelny vzryvchatykh sostavov nekogerentnym izlucheniym [Research of features of initiation are photosensitive explosive structures incoherent radiation] [Works of the International conference «16 Haritonov's scientific readings»]. Sarov. FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics], 2014, pp. 90-93 (in Russian).

##### *For materials of conferences (foreign references):*

- [7] Ishikawa M. et al. Reactor decommissioning in Japan: Philosophy and first programme. «N power performance and safety. Conference proceedings. Vienna, 28 September – 2 october 1987. V. 5. Nuclear Fuel Cycle». IAEA. Vienna. 1988. P. 121-124.

*Editorial office address (for sending printed correspondence):*

347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94

*Editorial office of «Global Nuclear Safety» journal*

*E-mail: [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru)*

*Tel: +79281883628, Nadezhda Lobkovskaya*

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Полный текст статьи, предназначенной для опубликования, должен быть подписан авторами, сопровождаться справкой о проверке материала через программу антиплагиата (допустимые заимствования и самоцитирование – не более 20%), представлением от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертным заключением о возможности опубликования.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- индекс УДК;
- название на русском и английском языках;
- структурированная аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- список литературы на русском и английском языках;
- сведения об авторах (ФИО, место работы, должность, ученая степень, звание, электронный адрес, телефон) на русском и английском языках;
- индексы ORCID и Researcher ID для каждого автора (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>).

Статья должна быть структурирована: введение (обзор проблем, цель работы); теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов, описание материалов и методов анализа, желательна статистическая обработка; обсуждение результатов; заключение. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы» и полученные результаты.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. 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. Включение таблиц в статью должно быть целесообразным. Таблицы должны иметь нумерацию и заголовки на русском и английском языках (10 пт). Желательно, чтобы таблицы не превышали одной страницы текста. Рисунки должны быть понятными при черно-белой печати, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами. Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой (СИ).

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 – 2,5 см. Желательный объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (12-20 источников). Если в тексте статьи менее 2500 знаков, статья может не рассматриваться.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт стран дальнего зарубежья, России и СНГ по рассматриваемой проблематике. Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.0.100-2018 (дата введения – 01.07.2019) «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Список литературы включает в не менее 12-и источников (из них не более 3-х ссылок на собственные работы), с обязательным включением как минимум 5-и источников позднее 2017 г., и не менее 4 ссылок на зарубежные (из стран дальнего зарубежья, за пределами бывшего СССР) исследования последних лет. Список литературы приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте в квадратных скобках номера источника. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала и сопровождаются, в случае перевода на русский язык, указанием на перевод. Учебники, учебные пособия, академические методические указания и рекомендации не включаются в список литературы. References приводятся после списка литературы на

русском языке (правила оформления см. в разделе The list of references standard in English). Библиография на английском языке должна быть оформлена в соответствии со стандартом Scopus. Укажите артикул DOI, если он есть.

Для принятия статьи в номер журнала необходимо разместить статью на платформе elpub – <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> – и по электронной почте [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru) предоставить следующие материалы:

- файл со статьей в формате Word;
- этот же файл в формате pdf с подписью авторов;
- справка о проверке материала на антиплагиат;
- представление от учреждения, в котором выполнена работа;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

#### ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

##### **Для книг с одним автором:**

*Кесслер, Г.* Ядерная энергетика / Г. Кесслер ; перевод с английского Ю.И. Митяев. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.

##### **Для книг с двумя и более авторами:**

*Емельянов, И.Я.* Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов / И.Я. Емельянов, П.А. Гаврилов, Б.Н. Селивестров. – Москва : Атомиздат, 1975. – 280 с.

##### **Для журналов в статье с одним автором:**

*Пантелей, Д.С.* Атомная энергетика как неотъемлемый компонент энергетического комплекса Российской Федерации / Д.С. Пантелей // Наукоедение. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 39.

##### **Для журналов в статье с более четырех авторами:**

Обогащение регенерированного урана в двойном каскаде газовых центрифуг с его максимальным возвратом в производство топлива / А.Ю. Смирнов, В.Е. Гусев, Г.А. Сулаберидзе, В.А. Невиница, П.А. Фомиченко // Вестник национального ядерного университета «МИФИ». – 2018. – Том 7, № 6. – С. 449-457.

##### **Для диссертаций:**

*Беликов, С.О.* Разработка методов интенсификации акустических резонансов и снижения уровня вибраций в главном паропроводе АЭС с ВВЭР-1000 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / С.О. Беликов. – Москва, 2013. – 30 с.

##### **Для депонированных работ:**

*Кондраш, А.Н.* Пропаганда книг / А.Н. Кондраш. – Москва, 1984. – 21 с. – Депонировано в НИЦ «Информпечать» 25.07.84. ФН 176.

##### **Описание архивных материалов:**

*Харитон, Ю.Б.* Письмо Б.Л. Ванникову о лаборатории для разработки атомных бомб // ЧУ «Центратомархив». Фонд № 1, опись № 1/с, дело № 228, л. 76-79. – URL : [http://elib.biblioatom.ru/text/carhiv\\_001-1s-228\\_076/go,0/](http://elib.biblioatom.ru/text/carhiv_001-1s-228_076/go,0/) (дата обращения : 26.03.2019).

Список ученых, участвующих в работе по использованию атомной энергии. 17 января 1946 // Атомная программа СССР : архивные документы. – ж URL : [http://elib.biblioatom.ru/text/arhiv\\_akademik-artsimovich\\_2009\\_386/go,0/](http://elib.biblioatom.ru/text/arhiv_akademik-artsimovich_2009_386/go,0/) (дата обращения : 03.09.2019).

##### **Материалы конференций:**

*Сулаберидзе, Г.А.* О некоторых разделительных проблемах при вовлечении регенерированного урана в топливный цикл / Г.А. Сулаберидзе, В.Д. Борисевич, Се Цюаньсинь // Сборник докладов IX Всероссийской (Международной) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», Россия, Звенигород, 4-8 октября. – Троицк : ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2004. – С. 78.

*Шишков, Ю.* Россия и мировой рынок: структурный аспект / Ю. Шишков // Социальные приоритеты и механизмы преобразований в России : материалы международной конференции, Москва, 12-13 мая 1998 г. – Москва : Мagma, 1993. – С. 19-25.

##### **Для патентов:**

Патент 2187888 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/38, Н 04 J 13/00. Приемопередающее устройство : заявитель и патентообладатель Воронежский научно-исследовательский институт связи. – № 2000131736/09 ; заявл. 18.12.00 ; опубл. 20.08.02, Чугаева В. И. – 3 с.

##### **Для электронных ресурсов:**

*Дирина, А.И.* Право военнослужащих РФ на свободу ассоциаций / А.И. Дирина // Военное право : сетевой журнал – 2010. – № 2. – URL : <http://voennoepravo.ru/node/2149> (дата обращения: 01.08.2018).

##### **Адрес редакции журнала:**

347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94. Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», e-mail: [oni-viti@mephi.ru](mailto:oni-viti@mephi.ru), тел.: +79281883628, Лобковская Надежда Ивановна

**ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**2022, 4(45)**

Главный редактор – М.Н. Стриханов, доктор физико-математических наук, профессор

Сдано в набор 07.12.2022 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 14.12.2022 г.

Бумага «Снегурочка» 80 г/м<sup>2</sup>. Объем 7,19 печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ

Цена свободная