

Журнал включен в перечень ВАК РФ (1047)

Группы научных специальностей:

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

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Выпускающий редактор:

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

Лю Дамин, профессор, Китайский институт ядерной энергетики, Китай

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

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

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

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

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

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

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

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

Сергей Эдуардович Гоок, PhD в области техн. наук, Институт производственных систем и технологий конструирования ИПК Общества Фраунгофера, Германия

Юлий Львович Чигиринский, доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Российская Федерация

Александр Евгеньевич Зверовицков, доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», Российская Федерация

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

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

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

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

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

Компьютерная верстка:

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

Регистрация СМИ:

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

Периодичность:

4 номера в год

Учредитель и издатель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес редакции:

115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

Типография:

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

Сайт:

<https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>

Тираж:

300 экз.

Цена:

Свободная

Подписной индекс:

10647 (объединенный каталог «Пресса России»)

Выход в свет:

17.09.2024



National Research Nuclear University MEPhI

Global Nuclear Safety

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

Vol. 14, No. 3, 2024

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Executive Editor:

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

Editorial Staff:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Computer layout:

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

Founded in November, 2011
Quarterly

Founder and Publisher:

Editorial address:

Printing house:

Website:

The circulation is:

The price:

The subscription index is:

Published on:

Reg. № FS77-47155, November, 3 2011

National Research Nuclear University MEPhI

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation

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

<https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>

300 copies

Is free

10647 in the catalogue «Press of Russia»

17.09.2024



Moscow

СОДЕРЖАНИЕ

Том 14, № 3 (52), 2024

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Особенности прохождения анизотропного ультразвукового излучения в глубоководных морских акваториях

А.П. Елохин, С.Е. Улин, А.Е. Шустов, Н.М. Свешников 6

О разработке нового поколения средств передачи и представления важной для безопасности АЭС технологической информации

Е.В. Воробьев, Г.Д. Новоселов, П.В. Поваров, Л.В. Цыхлер, А.Ю. Злобин 27

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Участие архитектора-инженера в жизненном цикле атомной станции: инструментарий, возможности, перспективы

О.В. Колтун, С.О. Иванов, Д.В. Якубов 35

Метеорологические особенности регионов строительства АЭС

К.Б. Орумо, А.И. Ксенофонтов, А.П. Елохин 42

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Модернизация насоса гидроподъема роторов паротурбинной установки К-1200-6,8/50

В.П. Поваров, Д.Е. Усачев, А.П. Щукин, В.А. Воротников, А.А. Лотарев 56

Обоснование перехода на эрбиевое топливо в реакторах типа ВВЭР-1000 на основе сравнительного анализа коэффициентов реактивности для гадолиниевого и эрбиевого выгорающих поглотителей

А.Р. Музафаров, В.И. Савандер 62

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

Формирование и развитие человеческого потенциала предприятий атомного энергетического машиностроения

М.В. Головки, В.А. Руденко, С.А. Томилин, В.Е. Довбыш 73

Приоритеты инновационной проектной деятельности в топливно-энергетическом комплексе России

Н.К. Савельева, А.А. Созинова, О.В. Фокина 87

Значение надпрофессиональных компетенций студентов технических вузов при формировании отраслевого кадрового резерва ГК «Росатом»

Т.С. Попова, С.В. Волгина, А.А. Попов, Т.А. Залиско 101

Авторский указатель номера 3 (52), 2024 109

CONTENTS

Vol. 14, No 3, 2024

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

- Peculiarities of anisotropic ultrasonic transmission passage in deep sea water areas**
A.P. Elokhin, S.E. Ulin, A.E. Shustov, N.M. Sveshnikov 6
- About the new data transfer and display system development for NPP safety**
E.V. Vorobiev, G.D. Novoselov, P.V. Povarov, L.V. Tsykhler, A.Y. Zlobin 27

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

- Architect-engineer participation in the life cycle of nuclear power plant: tools, opportunities and prospects**
O.V. Koltun, S.O. Ivanov, D.V. Yakubov 35
- Meteorological features of NPP construction regions in Nigeria**
K.B. Orumo, A.I. Ksenafontov, A.P. Elokhin 42

OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

- Modernisation of rotor hydraulic lift pump of steam turbine unit K-1200-6.8/50**
V.P. Povarov, D.E. Usachev, A.P. Shchukin, V.A. Vorotnikov, A.A. Lotarev 56
- Justification of the transition to erbium fuel in VVER-1000 type reactors based on a comparative analysis of reactivity coefficients for gadolinium and erbium burnable absorbers**
A.R. Muzafarov, V.I. Savander 62

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

- Formation and development of the human potential of nuclear power engineering enterprises**
M.V. Golovko, V.A. Rudenko, S.A. Tomilin, V.E. Dovbish 73
- Priorities of innovative project activities in the Russian fuel and energy sector**
N.K. Savelieva, A.A. Sozinova, O.V. Fokina 87
- Importance of supraprofessional competences of technical university students in the Rosatom State Corporation's sectoral personnel reserve formation**
T.S. Popova, S.V. Volgina, A.A. Popov, T.A. Zalisko 101

-
- Author Index of 3, 2024 109
-

Уважаемые читатели! Дорогие друзья и коллеги!

Настоящий выпуск журнала «Глобальная ядерная безопасность» приурочен к юбилейной XX Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики».

Проведенная впервые в далеком 2005 году, конференция явилась результатом продиктованной временем необходимости создания дискуссионной площадки для обсуждения широкого круга вопросов, связанных с развитием атомной энергетики.

Конференция на базе первого в г. Волгодонске инженерного вуза способствовала расширению и укреплению созданных к тому моменту в институте научных школ и направлений, а у представителей научного мира появилась возможность общения, обмена опытом, применения в дальнейшем на практике лучших достижений и результатов научных исследований.

За прошедшие годы конференция стала узнаваема и востребована в научном мире в России и за рубежом, полностью оправдывая свой международный статус и формат.

Она прочно вошла в календарь значимых научных, общественных мероприятий, объединила своими востребованными целями и задачами ученых, представителей ведущих предприятий атомной отрасли, экспертного сообщества, деловых кругов.

С каждым годом расширяется география участников, форум приобретает все более насыщенную повестку, состав прибывших на конференцию становится более авторитетным, дискуссии отличаются все более высоким уровнем.

Важная особенность конференции – ее преемственность: участниками научного форума могут стать не только ученые «с именем», но и начинающие исследователи.

С 2011 года материалы конференции находят отражение на страницах журнала "Глобальная ядерная безопасность", который является рецензируемым научным журналом, входит в Перечень ВАК и размещается в базе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Научные изыскания авторов становятся достоянием широкого круга исследователей, способствуют расширению сферы применения достигнутых результатов.

Убеждена, XX юбилейная конференция пройдет в творческом, конструктивном ключе, что даст возможность всесторонне обсудить широкий круг актуальных вопросов, связанных с развитием атомной энергетики, достижением технологического суверенитета и национальной безопасности. Выражаю уверенность, что материалы конференции позволят выработать новые подходы к решению существующих проблем, а ее результаты будут содействовать эффективному экспертному сопровождению государственных проектов и программ.

***Заместитель главного редактора журнала,
руководитель ВИТИ НИЯУ МИФИ,
д-р социол. наук, профессор,
депутат Законодательного Собрания Ростовской области VI созыва
В.А. Руденко***

УДК 621.37: 534.321.9

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-01>

EDN CUHJST

Оригинальная статья / Original paper



Особенности прохождения анизотропного ультразвукового излучения в глубоководных морских акваториях

А.П. Елохин  , С.Е. Улин , А.Е. Шустов , Н.М. Свешников

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация
 elokhin@yandex.ru

Аннотация. В рамках работ, посвященных оценкам радиоактивного загрязнения донной поверхности глубоководных морских акваторий, необходимо решить проблему передачи оператору информации, полученной подводным дозиметрическим комплексом. Использование стандартного радиоканала в таких условиях невозможно, поэтому целесообразно использовать ультразвуковой канал передачи информации. В связи с чем и рассматривается вопрос прохождения ультразвукового анизотропного излучения в глубоководной морской акватории. Анизотропность излучения необходима для уменьшения погрешности и повышения надежности передачи информации. С этой целью формулируется краевая задача по оценке давления ультразвука на водную среду и приводится ее решение в виде волнового уравнения в морской воде. Уделяется внимание таким характеристикам морских акваторий, как соленость воды, давление столба жидкости, определяющего ее плотность, температуру, дальность распространения излучения с учетом его частотных характеристик. Решение задачи осуществляется известным методом разделения переменных в сферической геометрии с учетом анизотропии излучения, заданные характеристики которого определялись на основе оптимального выбора направления излучения на ультразвуковое буферное устройство, располагающееся на водной поверхности акватории, определяемого экспериментально. Результаты расчета показали, что при частоте излучения 1 кГц детектор надежно регистрирует сигнал на расстоянии ~ 1 км. С ростом частоты сигнал заметно поглощается и при частоте излучения ~ 40 кГц начинает резко падать с расстояния ~ 20 м. Аналогичные результаты были получены и при решении задачи в виде излучения широкого пучка. Результаты решения задач, позволяют сформулировать определенные требования к конструкции ультразвуковых детекторов, используемых для подводной передачи информации, что позволит реализовать метод передачи информации из глубоководных акваторий при использовании подводного дозиметрического комплекса и, кроме того, разработать звуковой способ связи в условиях глубоководных акваторий, что сыграет значительную роль при решении проблем передачи информации в этих специфических условиях.

Ключевые слова: морские акватории, подводный дозиметрический комплекс, буферное устройство, свойства ультразвука, соленость морской воды, частота излучения, краевые задачи, сферическая геометрия.

Для цитирования: Елохин А.П., Улин С.Е., Шустов А.Е., Свешников Н.М. Особенности прохождения анизотропного ультразвукового излучения в глубоководных морских акваториях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):6–26. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-01>

For citation: Elokhin A.P., Ulin S.E., Shustov A.E., Sveshnikov N.M. Peculiarities of anisotropic ultrasonic transmission passage in deep sea water areas. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):6–26 (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-01>

Peculiarities of anisotropic ultrasonic transmission passage in deep sea water areas

Alexander P. Elokhin  , Sergey E. Ulin , Alexander E. Shustov ,
Nikita M. Sveshnikov
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation
 elokhin@yandex.ru

Abstract. It is necessary to solve the problem of transmitting to the operator the information received by the underwater dosimetric complex within the framework of the works devoted to estimations of radioactive contamination of the bottom surface of deep sea areas. The use of standard radio channel in such conditions is impossible, therefore it is expedient to use ultrasonic channel of information transmission. Thus, the issue of ultrasonic anisotropic radiation transmission in deep sea water area is considered. Anisotropy of radiation is necessary to reduce the error and increase the reliability of information transmission. A boundary value problem to estimate the ultrasound pressure on the aquatic medium is formulated and its solution in the form of a wave equation in seawater is given. Attention is paid to such characteristics of sea water areas as water salinity, liquid column pressure determining its density, temperature, range of radiation propagation taking into account its frequency characteristics. The problem is solved by the known method of separation of variables in spherical geometry taking into account the anisotropy of radiation, the given characteristics of which are determined on the basis of the optimal choice of the radiation direction to the ultrasonic buffer device located on the water surface of the water area, determined experimentally. The calculation results show that at the radiation frequency of 1 kHz the detector reliably registers the signal at a distance of ~ 1 km. As the frequency increases, the signal is noticeably absorbed and at a radiation frequency of ~ 40 kHz begins to fall sharply from a distance of ~ 20 m. Similar results are obtained when the problem is solved in the form of radiation of a wide beam. The results of solving the problems allow to formulate certain requirements for the design of ultrasonic detectors used for underwater transmission of information, which will make it possible to implement the method of information transmission from deep water areas when using an underwater dosimetric complex and, in addition, to develop a sound method of communication in deep water areas, which will play a significant role in solving the problems of information transmission in these specific conditions.

Keywords: sea areas, underwater dosimetric complex, buffer device, ultrasound properties, sea water salinity, radiation frequency, boundary value problems, spherical geometry.

Введение

При проведении работ, связанных с радиационным контролем окружающей среды, рассматривают не только радиоактивное загрязнение воздушного бассейна и подстилающей поверхности, но и придонной поверхности глубоководных морских и речных акваторий. В этом убеждают известные радиационные аварии, которые имели место в губе Андреева¹ (1982 г.) и бухте Чажма²

(1985 г.) в СССР. Радиационная авария на АЭС Фукусима-1 в 2011 г. в Японии, к сожалению, продолжила этот список при радиоактивном загрязнении (тритием и углеродом-14) вод Тихого океана, куда, в настоящее время, сбрасывают частично очищенную воду, которая использовалась для охлаждения реакторов после аварии³.

Использовать традиционные методы радиационного контроля в таких условиях весьма затруднительно, поскольку требуется не только отбор проб загрязненной воды, но

¹ Операции на губе: как ликвидируют ядерное наследие на берегу Баренцева моря. – Страна Росатом : отраслевое издание госкорпорации «Росатом». – Режим доступа: <https://stranarosatom.ru/2021/10/21/operacii-na-gube-kak-likvidirujut-yader/> (дата обращения: 10.06.2024).

² Саркисов А.А., Высоцкий В.Л. Ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма. Реконструкция событий и анализ последствий.

Вестник Российской академии наук. 2018;88(7):599–618. <https://doi.org/10.31857/S086958730000083-9>

³ Слив подсчитан: Япония сбросит в океан более 1 млн. т. радиоактивной воды. – РБК. – Режим доступа: <https://prim.rbc.ru/prim/23/08/2023/64e5cf4a9a7947163505764d> (дата обращения: 10.06.2024).

и донных отложений, расположенных на значительной глубине, что и определяет сложность проблемы подобного радиационного контроля. На малых глубинах еще можно использовать технологию «удочки» – сканировать донную поверхность, опуская с плав средства, на котором располагается оператор, дозиметрическое оборудование (γ -спектрометр, γ -детектор и др.) на дно водоема [1], но с увеличением глубины погружения приборов это становится весьма проблематичным, так как радиоканал передачи данных не работает в морской воде на глубинах больше 5 м, а для передачи данных с дозиметрического оборудования, в этом случае, необходимо использовать кабель связи, длина которого будет расти по мере увеличения глубины и удаленности оператора от точки наблюдения [2]. Поэтому и возникает задача разработки средства для беспилотного сканирования донной поверх-

ности с интерактивным вмешательством оператора и автономным режимом работы беспилотного подводного дозиметрического комплекса (ПДК) [3–5] (рис. 1). В качестве инструмента прямой связи оператора с ПДК и в обратном направлении авторы работ [6–8] предложили использовать ультразвуковой детектор, устанавливаемый на платформе на внешней поверхности ПДК, схема устройства и принцип работы которого приведены на рисунке 2.

При изучении вопроса передачи информации в водной среде обычно сталкиваются с проблемой прохождения излучения в пресной или соленой воде. Известно, что электромагнитное излучение в виде радиоволн имеет ограниченное распространение в водной среде, при этом в пресной воде оно составляет не более 10 м, а в соленой еще меньше, т.е. ~ 5 м.

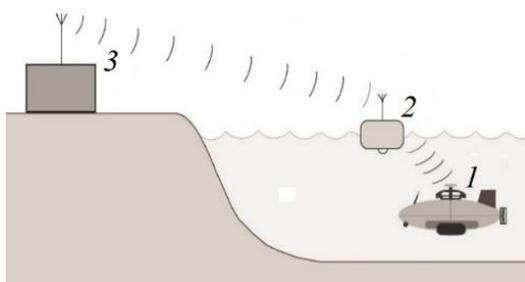


Рисунок 1. Схематическое изображение метода приема-передачи данных оператором с рабочей станции на ПДК через буферное устройство. 1 – подводный дозиметрический комплекс (ПДК); 2 – буферное устройство; 3 – рабочая станция оператора [5,6]

Figure 1. Schematic representation of the data reception-transmission method by the operator from the workstation to the MPC through the buffer device. 1 – underwater dosimetric complex (UDC); 2 – buffer device; 3 – operator's workstation [5,6]

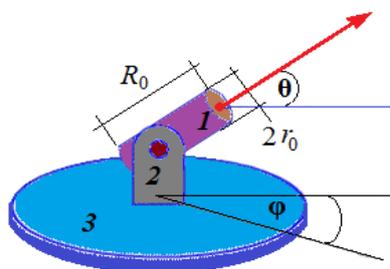


Рисунок 2. Принципиальная схема устройства поиска оптимального направления передачи информации с ПДК на буферное устройство: 1 – ультразвуковой детектор; 2 – стойка; 3 – платформа, описывающая вместе с излучателем при своем вращении верхнюю полусферу [5,6]

Figure 2. Schematic diagram of the device to search for the optimal direction of information transfer from the UDC to the buffer device: 1 – ultrasonic detector; 2 – rack; 3 – platform, describing together with the transmitter in its rotation of the upper hemisphere [5,6]

Напротив, распространение ультразвука в воде обладает определенным преимуществом, которое, в отличие от электромагнитных волн, состоит в том, что он может распространяться только в упругой среде (воздухе, жидкости и т.д.), создавая локальные перепады давления, образующие движущиеся волны. В общей сложности распространение этого вида излучения зависит от температуры среды, ее солености, давления столба воды, частоты излучения, а скорость его распространения c_0 составляет величину $\sim 1,5$ км/с. Поэтому использование этого вида излучения требует изучения всех указанных особенностей, что и позволит, в конечном итоге, найти оптимальное решение указанной проблемы. Задача, частично, осложняется еще и тем, что при прохождении ультразвука в водной среде происходит его поглощение, которое существенно зависит от частоты излучения. Поэтому передатчик информации должен обладать определенными свойствами, которые позволили бы передавать информации в заданном спектре частот на заданное расстояние $R \sim 1$ км без существенной потери мощности излучения, т.е. ультразвуковой детектор должен обладать свойством резко выраженной направленности, которая позволит увеличить дальность действия акустических волн без дополнительного увеличения мощности. Эти требования и обуславливают интерес авторов к задаче прохождения анизотропного ультразвукового излучения в глубоководных морских акваториях, поскольку в литературе, как правило, рассматривается задача изотропного излучения пульсирующей сферической поверхности. [9]

Основная часть

В конечном итоге задача ставится следующим образом. В придонной поверхности морской акватории осуществляется сканирование ее радиоактивного загрязнения. Полученные результаты с частотой $\omega_{\text{изл}}$ передаются на буферное устройство, расположенное на водной поверхности акватории, при помощи ультразвукового передатчика, установленного на ПДК (см. рис. 1), предварительно определив оптимальное направление излучения. Последнее достигается

путем использования этого передатчика с узкой диаграммой направленности в качестве прямо-передающего устройства, регистрирующего ответный сигнал, для дискретно заданных значений в азимутальном (меридиональном) и «широтном» направлениях (см. рис. 2) [5,6]. Максимальное значение ответного сигнала и означает выбор оптимального направления, в котором целесообразно проводить связь (см. табл. 1). При выборе этого направления детектор описывает полусферу радиусом $R_0 = l$ (l – длина ультразвукового детектора), вращаясь вокруг своей оси в азимутальном $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ и широтном $0 \leq \theta < \pi/2$ направлениях, располагаясь, практически, на донной поверхности акватории.

Таблица 1. Значение показаний ультразвукового детектора при выборе оптимального направления (отн. ед.)

Table 1. Value of ultrasonic detector readings when the optimum direction is selected (relative units)

φ/θ	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
φ_0	0	15	30	45	60	75	90
φ_1	30	63	63	69	80	70	63
φ_2	60	78	82	90	100	90	82
φ_3	90	73	70	70	75	71	56
φ_4	120	57	60	64	67	67	67
φ_5	150	61	52	59	67	49	59
φ_6	180	60	36	48	46	49	53
φ_7	210	19	31	46	54	25	39
φ_8	240	29	22	25	42	54	60
φ_9	270	41	52	56	50	38	27
φ_{10}	300	34	30	24	15	9	6
φ_{11}	330	6	6	6	6	16	16
φ_{12}	360	6	6	4	3	3	9

Распространение ультразвукового излучения в воде описывается волновым уравнением для давления $P(r, \theta, \varphi, t)$, которое оказывает излучение детектора диаметром $2r_0$ на окружающую его среду (воду), при переносе информации с относительной скоростью распространения ультразвука в воде $c = c_0/R_0$ в направлении безразмерного радиуса $r' = r/R_0$, которое в сферической геометрии имеет вид выражения (1) [9] с граничными условиями (2), (3):

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \times \left[\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \varphi^2} \right) \right] = 0, \quad (1)$$

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{r=R_0} = P_0(r)|_{r=R_0} \delta(\theta - \theta^*) \delta(\varphi - \varphi^*), \quad (2)$$

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{r=\infty} = 0. \quad (3)$$

Произведение δ -функций в граничном условии (2), в рамках рассматриваемой модели, физически определяет диаграмму «рассеяния» излучения, а значение $P_0(r) = P_{\text{изл}} \cdot \exp(-\alpha r)$, ($P_{\text{изл}}$ – мощность ультразвукового детектора при его контакте с водой на границе сферы при $r = R_0$ с частотой $\omega_{\text{изл}}$ в точке излучения под углами $\theta = \theta^*$, $\varphi = \varphi^*$) зависит от коэффициента поглощения акустических волн α (Нп/км)⁴, который, в свою очередь, зависит от частоты излучения $\omega_{\text{изл}}$, кГц; химического состава солей (табл. 2); солености морской воды S ‰; гидростатического давления воды p , атм; температуры T , К и определяется выражением (4), [9]:

$$\alpha = \left(\frac{A \cdot \omega_T \cdot \omega_{\text{изл}}^2 S}{\omega_T^2 - \omega_{\text{изл}}^2} + \frac{B \cdot \omega_{\text{изл}}^2}{\omega_T} \right) (1 - C \cdot p), \quad (4)$$

где $\omega_T = 21,9 \cdot 10^6$ кГц; $A = 2,34 \cdot 10^6$ Нп/(кГц·км); $B = 3,38 \cdot 10^6$ Нп/(кГц·км); $C = 6,54 \cdot 10^{-4}$ ат⁻¹.

Таблица 2. Химический состав солей морской воды, %

Table 2. Chemical composition of seawater salts, %

Хлориды: 88,7%	NaCl (77,8)	MgCl (10,9)	–
Сульфаты: 10,8%	K ₂ SO ₄ (2,5)	MgSO ₄ (4,7)	CaSO ₄ (3,6)
Карбонаты: 0,34%	KCO ₃ (0,2)	–	CaCO ₃ (0,14)
Бромистый магний и др.	MgBr ₂ (0,16)	–	–

На рисунках 3-5 представлены зависимости солености, температуры и плотности

⁴ Непер (Нп) – логарифмическая безразмерная единица измерения отношения двух уровней, затуханий или усилений. Непер не входит в систему единиц СИ. Разница между децибелом и непером заключается в том, что отношение величин, выраженное децибелах, предполагает использование десятичных логарифмов, тогда как для отношения в неперах используются натуральные логарифмы. Для перехода к децибелам следует учитывать, что 1 Нп = 8,686 дБ.

морской воды как функции глубины [10]. Ограничиваясь глубиной 200 м (согласно принятым условиям на разработку) можно констатировать следующее. Согласно представленному на рисунке 3 графику соленость морской воды до глубины 400 м можно аппроксимировать линейной зависимостью $S(h) = 35,5 - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot h$ для h на интервале $0 \leq h \leq 400$ м. В общем случае соленость морей зависит от соотношения атмосферных осадков и испарения, притока поверхностных вод, таяния ледников и т.д. и приводится в таблице 3. Относительно температуры (рис. 4) можно констатировать ее постоянство до глубины 200 м, что определяет постоянство и коэффициента ω_T , в формуле (4), описывающей коэффициент α , а изменение плотности воды (рис. 5) можно также представить в виде ее линейной зависимости в указанном диапазоне глубин выражением: $\rho(h) = 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot h + 1,025$ г/см³, но в силу незначительного характера изменений можно ограничиться средней величиной $\rho(h) = 1,026$ г/см³, при этом гидростатическое давление воды p , присутствующее в формуле коэффициента поглощения, определится давлением столба воды $p = \bar{\rho}gh$ Н/см², где g – ускорение свободного падения. Таким образом, изменения коэффициента поглощения морской воды α на глубине не больше 200 м в основном, будет зависеть от солености воды $S(h)$ и частоты излучения $\omega_{\text{изл}}$.

Таблица 3. Соленость воды в некоторых морях и заливах в (‰)

Table 3. Water salinity in some seas and bays in (‰)

Средиземное море	39
Черное море	18
Карское море	10
Баренцево море	35
Бенгальский залив	42
Красное море	43
Карибское море	35

⁵ Графическое представление зависимостей можно найти по ссылке: <https://studfile.net/preview/6075064/page:3/>

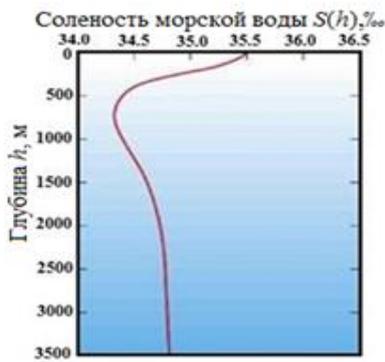


Рисунок 3. Зависимость солености морской воды $S(h)$ ‰ от глубины h м⁵ (Галоклин)
Figure 3 Dependence of seawater salinity $S(h)$ ‰ on depth h m [10] (Galoclin)

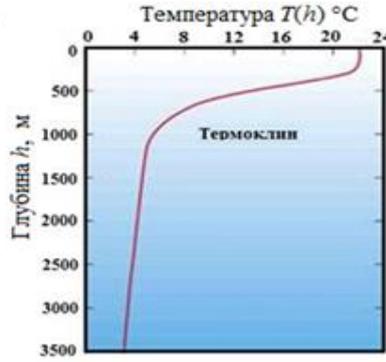


Рисунок 4. Зависимость температуры $T(h)$ °C морской воды от глубины h м⁵ (Термоклин)
Figure 4. Dependence of seawater temperature $T(h)$ °C on depth h m [10] (Thermocline)

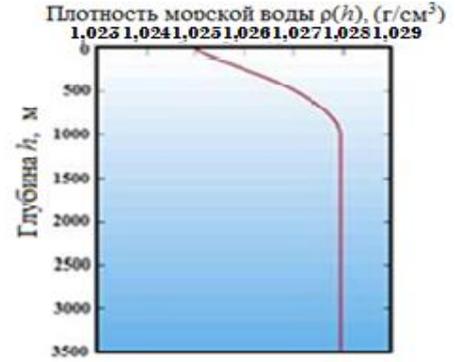


Рисунок 5. Зависимость плотности $\rho(h)$ (г/см³) морской воды от глубины h м⁵ (Пикноклин)
Figure 5. Dependence of seawater density $\rho(h)$ (g/cm³) on depth h m [10] (Pycnocline)

В широтном диапазоне углов граничное условие представим в виде выражения (5):

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{\theta=\theta^*} = P_0(r)\delta(\theta - \theta^*), \quad (5)$$

где угол θ^* определяется детектором согласно выбору оптимального направления (см. табл. 1 и рис. 6).

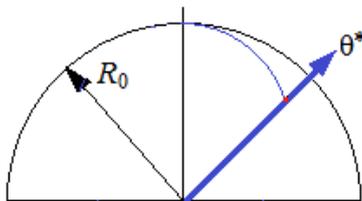


Рисунок 6. Условие излучения ультразвукового детектора из подводного положения в широтном направлении
Figure 6. Ultrasonic detector radiation condition from underwater position in latitudinal direction

Последнее означает, что широтные значения угла θ ультразвукового излучения лежат в верхней полусфере области их определения, поскольку, согласно условиям задачи $P(r, \theta, \varphi, t) \equiv 0$ при $\theta \geq \pi/2$ (см. рис. 6). Для азимутального (меридионального) направления граничное условие представим в виде выражения (6):

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{\varphi=\varphi^*} = P_0(r)\delta(\varphi - \varphi^*), \quad (6)$$

где угол φ^* также определяется детектором по оптимальному направлению (см. табл. 1 и рис. 7). Начальные условия формулируем следующим образом в выражениях (7), (8):

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{t=0} = P_0(r)\delta(\theta - \theta^*)\delta(\varphi - \varphi^*), \quad (7)$$

$$\frac{dP}{dt}(r, \theta, \varphi, t)|_{t=0} = 0. \quad (8)$$

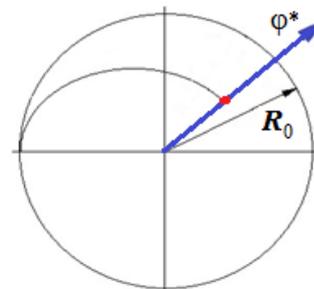


Рисунок 7. Условие излучения ультразвукового детектора из подводного положения в азимутальном направлении
Figure 7. Ultrasonic detector radiation condition from underwater position in azimuthal direction

Метод решения задачи

Для решения задачи (1) – (8) представим искомую функцию $P(r, \theta, \varphi, t)$ в виде суммы в выражении (9):

$$P(r, \theta, \varphi, t) = P_1(r) + P_2(r, \theta, \varphi, t). \quad (9)$$

Для функции $P_1(r)$ ставится задача (10), (11), (12):

$$\Delta P_1 = 0, \quad (10)$$

$$P_1(r)|_{r=R_0} = P_0(R_0)\delta(\theta - \theta^*)\delta(\varphi - \varphi^*), \quad (11)$$

$$P_1(r)|_{r=\infty} = 0, \quad (12)$$

где $\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right)$ – оператор Лапласа

в сферической геометрии, а граничные условия (11), (12) определяют значения постоянных коэффициентов решения уравнения (10). Для функции $P_2(r, \theta, \varphi, t)$ будет справедливо уравнение (13) с граничными условиями (14), (15), (16), (17):

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P_2}{\partial t^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial P_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left[\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial P_2}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 P_2}{\partial \varphi^2} \right) \right] = 0, \quad (13)$$

$$P_2(r, \theta, \varphi, t)|_{r=R_0} = 0, \quad (14)$$

$$P_2(r, \theta, \varphi, t)|_{r=\infty} = 0, \quad (15)$$

$$P_2(r, \theta, \varphi, t)|_{\theta=\theta^*} = P_0(r)\delta(\theta - \theta^*) - P_1(r), \quad (16)$$

$$P_2(r, \theta, \varphi, t)|_{\varphi=\varphi^*} = P_0(r)\delta(\varphi - \varphi^*) - P_1(r), \quad (17)$$

которые дадут возможность получить собственные значения для собственных функций, определяющих решение уравнения (13), и начальными условиями (18), (19):

$$P_2(r, \theta, \varphi, t)|_{t=0} = P_0(r)\delta(\theta - \theta^*) \times \delta(\varphi - \varphi^*) - P_1(r), \quad (18)$$

$$\frac{dP_2}{dt}(r, \theta, \varphi, t)|_{t=0} = 0. \quad (19)$$

Подставляя в формулу (13) функцию $P_2(r, \theta, \varphi, t) = e^{i\omega_c t} V(r) Y(\theta, \varphi)$, где i – мнимая единица, ω_c – собственная частота переноса излучения (c^{-1}) и учитывая, что размерность величины c аналогична частоте ω_c , формально можно положить ($\omega_c = c = c_0/R_0$), и при $\omega_c \neq \omega_{\text{изл}}$ получим следующее выражение:

$$\frac{\omega_c^2}{c^2} V(r) Y(\theta, \varphi) + \frac{Y(\theta, \varphi)}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{V(r)}{r^2} \left[\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial Y(\theta, \varphi)}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 Y(\theta, \varphi)}{\partial \varphi^2} \right) \right] = 0,$$

в котором, применяя метод разделения переменных [11], умножим каждое слагаемое на r^2 и разделим на произведение $V(r) Y(\theta, \varphi)$. При этом получим сумму двух отношений,

приравнивая каждое из которых к некой постоянной λ , получаем два уравнения (20), (21) для функций $V(r)$ и $Y(\theta, \varphi)$ соответственно:

$$\frac{\frac{\omega_c^2 r^2}{c^2} V(r) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right)}{V(r)} = - \frac{\left[\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial Y(\theta, \varphi)}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 Y(\theta, \varphi)}{\partial \varphi^2} \right) \right]}{Y(\theta, \varphi)} = \lambda,$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \left(\frac{\omega_c^2 r^2}{c^2} - \lambda \right) V(r) = 0, \quad (20)$$

$$\left[\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial Y(\theta, \varphi)}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 Y(\theta, \varphi)}{\partial \varphi^2} \right) \right] + \lambda Y(\theta, \varphi) = 0. \quad (21)$$

Функцию $Y(\theta, \varphi)$ также можно представить в виде произведения функций, каждая из которых зависит от одного аргумента $Y(\theta, \varphi) = \Theta(\theta)\Psi(\varphi)$. Подставляя произведение функций в формулу (21), разделяя переменные и, поделив каждое из слагаемых на произведение функций $\Theta(\theta)\Psi(\varphi)$, также получим выражение, состоящее из двух слагаемых, каждое из которых представляет отношение:

$$\frac{\Psi(\varphi)}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \Theta(\theta)}{\partial \theta} \right) + \frac{\Theta(\theta)}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 \Psi(\varphi)}{\partial \varphi^2} \right) + \lambda \Theta(\theta) \Psi(\varphi) = 0.$$

$$\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \Theta(\theta)}{\partial \theta} \right) = m \rightarrow \frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \Theta(\theta)}{\partial \theta} \right) - m \Theta(\theta) = 0, \quad (22)$$

$$\frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 \Psi(\varphi)}{\partial \varphi^2} \right) + \lambda \Psi(\varphi) = -m \rightarrow \left(\frac{\partial^2 \Psi(\varphi)}{\partial \varphi^2} \right) + \sin^2(\theta) (\lambda + m) \Psi(\varphi) = 0, \quad (23)$$

Отметим, что в уравнении (23) $\sin^2(\theta)$ является ограниченным параметром, который не зависит от φ и для функции $\Psi(\varphi)$ может играть роль просто некоторой постоянной. В таком случае произведение постоянных $\sin^2(\theta)(\lambda+m)$ можно определить одной постоянной $\mu = \sin^2(\theta)(\lambda+m)$, что дает возможность

сокращая одноименные функции в каждом из отношений и приравнявая каждое из выражений некоей постоянной m , полученное выражение перепишем в следующем виде:

$$\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \Theta(\theta)}{\partial \theta} \right) = \frac{\Theta(\theta)}{\Theta(\theta)} = \frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 \Psi(\varphi)}{\partial \varphi^2} \right) + \lambda \Psi(\varphi) = m,$$

из которого следует два уравнения – (22) и (23):

найти постоянную m из равенства [9]: $m = \mu / \sin^2(\theta) - \lambda$, при которой уравнение (22) будет иметь вид выражения (24), а уравнение (23) представим в виде выражения (25):

$$\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \Theta(\theta)}{\partial \theta} \right) + \left(\lambda - \frac{\mu}{\sin^2(\theta)} \right) \Theta(\theta) = 0, \quad (24)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \Psi(\varphi)}{\partial \varphi^2} \right) + \mu \Psi(\varphi) = 0. \quad (25)$$

При условии периодичности функции $\Psi(\varphi)$: $\Psi(\varphi + 2\pi) = \Psi(\varphi)$, это уравнение будет иметь множество решений только при целом $\mu = n^2$ [9], при этом линейно независимые решения определяются функциями $\cos(n\varphi)$ и

$\sin(n\varphi)$, где $n = 0, 1, 2, \dots, N$ так, что $\Psi_{-n}(\varphi) = A_{-n} \cos(n\varphi)$, $\Psi_n(\varphi) = A_n \sin(n\varphi)$, а уравнение (24) будет выглядеть следующим образом в выражении (26):

$$\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial \Theta(\theta)}{\partial \theta} \right) + \left(\lambda - \frac{n^2}{\sin^2(\theta)} \right) \Theta(\theta) = 0. \quad (26)$$

Для решения уравнения (26) проводят замену переменных, полагая $x = \cos(\theta)$, $-1 < x < +1$, $\Theta(\theta) = U(x)$ и, рассматривая $\Theta(\theta)$ как сложную функцию $\Theta = \Theta(U(x(\theta)))$, после несложных преобразований вместо выражения (26), получают уравнение Лежандра (27) [12], допускающее ограниченное решение только при $\lambda = \nu(\nu + 1)$ [13], в котором пара-

метр n называют порядком, а постоянную ν – степенью. Этими решениями при $n \leq \nu$ являются присоединенные полиномы Лежандра $P_\nu^n(x)$, что позволяет функцию $Y(\theta, \varphi)$ записать как [9,12]: $Y(\theta, \varphi) = U(\cos(\theta))\Psi(\varphi)$, которую представляют в виде ряда (28):

$$(1-x^2)\frac{d^2U}{dx^2} - 2x\frac{dU}{dx} + \left[\lambda - \frac{n^2}{1-x^2}\right]U = 0, \quad (27)$$

$$Y_\nu(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\nu} (A_n \cos(n\varphi) + B_n \sin(n\varphi)) P_\nu^n(\cos(\theta)), \quad (28)$$

где при $x = \cos(\theta)$, $P_\nu^n(x)$ имеет вид:

$$P_\nu^n(x) = \frac{(-1)^n}{2^n \nu!} (1-x^2)^{\frac{n}{2}} \frac{d^{n+\nu}(1-x^2)^\nu}{dx^{n+\nu}}. \text{ На интер-$$

вале $-1 < x < +1$ функции $P_\nu^n(x)$ как различной степени ν , так и различного порядка n ортогональны [11], т.е.

$$\int_{-1}^1 P_\nu^n(x) P_{\nu'}^{n'}(x) dx = 0, \nu \neq \nu' \text{ или } n \neq n' \quad [11, 12], \text{ при этом получают выражение (29) [14]:}$$

$$\int_{-1}^1 [P_\nu^n(x)]^2 dx = \left(\frac{2}{2\nu+1}\right) \frac{(\nu+n)!}{(\nu-n)!}. \quad (29)$$

Для решения уравнения (20) продифференцируем его и приведем к виду

$$V'' + \frac{2V'}{r} + \left[k^2 - \frac{\nu(\nu+1)}{r^2}\right]V = 0; \quad k = \omega_c/c = 1,$$

а после подстановки $V(r) = R(r)/\sqrt{r}$ получаем

$$\text{выражения } V'(r) = \frac{2R'r - R}{2r^{3/2}} \text{ и}$$

$$V''(r) = \frac{R''}{r^{1/2}} - \frac{R'}{r^{3/2}} + \frac{3}{4} \frac{R}{r^{5/2}}, \text{ подставляя кото-}$$

рые в последнее уравнение, получим

$$R'' + \frac{R'}{r} + \left[1 - \frac{(\nu+1/2)^2}{r^2}\right]R = 0.$$

Функции $j_\nu(r)$ и $y_\nu(r)$ в формуле (31) могут быть выражены через элементарные функции [12]:

$$j_\nu(r) = r^{-1} [P(\nu+1/2, r) \sin(r-\nu\pi/2) + Q(\nu+1/2, r) \cos(r-\nu\pi/2)];$$

$$y_\nu(r) = (-1)^{\nu+1} r^{-1} [P(\nu+1/2, r) \cos(r-\nu\pi/2) - Q(\nu+1/2, r) \sin(r-\nu\pi/2)],$$

Полученное уравнение представляет собой уравнение Бесселя полуцелого порядка, линейно-независимые решения которого определяются цилиндрическими функциями полуцелого порядка [9,11]: Выбор решения $R(r)$ осуществляют, исходя из физических условий задачи [9], в частности, в рассматриваемой задаче, требуя ограниченности решения на бесконечности, в соответствии с условием (15): $R_0 \leq r \leq \infty$. $R(r) = Z_{\nu+1/2}(r)$, где $Z_{\nu+1/2}(r)$ – есть решение уравнения Бесселя с параметром $p = \nu+1/2$, которые также обладают свойством ортогональности с весом $r^{-(\nu+1/2)}$ [15]. При этом функция $V(r)$ запишется в виде выражения (30) [11]:

$$V(r) = \frac{R(r)}{\sqrt{r}} = \sqrt{\frac{\pi}{2r}} Z_{\nu+1/2}(r) \quad (30)$$

Этим условиям удовлетворяет вторая цилиндрическая функция Ханкеля полуцелого порядка (31) [9]:

$$Z_{\nu+1/2}(r) = H_{\nu+1/2}^{(2)}(r) = \sqrt{(\pi/2r)} h_\nu^{(2)}(r);$$

$$h_\nu^{(2)}(r) = j_\nu(r) - iy_\nu(r). \quad (31)$$

где

$$P(v+1/2, r) = 1 - \frac{(v+2)!}{2!\Gamma(v-1)}(2r)^{-2} + \frac{(v+4)!}{4!\Gamma(v-3)}(2r)^{-4} - \dots = \sum_{m=0}^{v/2} (-1)^m (v+1/2, 2m)(2r)^{-2m},$$

$$Q(v+1/2, r) = \frac{(v+1)!}{1!\Gamma(v)}(2r)^{-1} - \frac{(v+3)!}{3!\Gamma(v-2)}(2r)^{-3} + \frac{(v+5)!}{5!\Gamma(v-4)}(2r)^{-5} - \dots = \sum_{m=0}^{[(v-1)/2]} (-1)^m (v+1/2, 2m+1)(2r)^{-2k-1}$$

$$(v = 0, 1, 2, \dots).$$

Значения функции $(v+1/2, m)$ для различных v и m представлены в таблице 4. При этом зависимость давления ультразвуковой волны как функция расстояния r , т.е. распространение ультразвука в водной среде, будет определяться действительной частью функции $\text{Re } h_v^{(2)}(r) = j_v(r)$ выражения (31). Решение задачи (10) – (12) с учетом граничных условий (11), (12) определяется выражением (32):

$$P_1(r) = P_{\text{изл}} \frac{R_0}{r} \exp(-\alpha R_0) \delta(\theta - \theta^*) \delta(\varphi - \varphi^*). \quad (32)$$

Таким образом, произведение функций $V(r)Y(\theta, \varphi)$ представляет собой выражение (33). Чтобы получить общее решение для функции $P_2(r, \theta, \varphi, t)$, необходимо еще умножить выражение (33) на $\exp(\pm i\omega_c t)$ или, что аналогично выражению $[C_1 \cos(\omega_c t) + C_2 \sin(\omega_c t)]$, и воспользоваться начальным условием (19), что дает возможность положить $C_2 = 0$. Последнее позволяет записать окончательное решение уравнения (13) в виде (34), в котором постоянные A_{vn} и B_{vn} будут содержать постоянную C_1 :

$$V(r)Y(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r), \quad (33)$$

$$P_2(r, \theta, \varphi, t) = \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \cos(\omega_c t) \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r). \quad (34)$$

Таблица 4. Значение функции $(v+1/2, m) = [(v+m)!]/[v!\Gamma(v-m+1)]$ [12]

Table 4. Function value $(v+1/2, m) = [(v+m)!]/[v!\Gamma(v-m+1)]$ [12]

$(v+1/2, m) = \frac{(v+m)!}{v!\Gamma(v-m+1)}, [12]$					
m	1	2	3	4	5
v					
v					
1	2				
2	6	12			
3	12	60	120		
4	20	180	840	1680	
5	30	420	3360	15120	30240

Решение задачи распространения ультразвука в водной среде для внешней краевой задачи будет определяться, согласно [9], выражением (34). Для определения постоянных

A_{vn} и B_{vn} необходимо использовать граничные условия (16), (17) и начальное условие (18) при $t = 0$. Таким образом, имеем выражения (35) – (37):

$$\begin{aligned}
P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \delta(\theta - \theta^*) \left[r^{1/2} \exp(-\alpha r) - \exp(-\alpha R_0) \frac{R_0}{r^{1/2}} \delta(\varphi - \varphi^*) \right] = \\
= \cos(\omega_c t) \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r),
\end{aligned} \tag{35}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \delta(\varphi - \varphi^*) \left[r^{1/2} \exp(-\alpha r) - \exp(-\alpha R_0) \frac{R_0}{r^{1/2}} \delta(\theta - \theta^*) \right] = \\
= \cos(\omega_c t) \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r),
\end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \delta(\varphi - \varphi^*) \delta(\theta - \theta^*) \left[r^{1/2} \exp(-\alpha r) - \exp(-\alpha R_0) \frac{R_0}{r^{1/2}} \right] = \\
= \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r).
\end{aligned} \tag{37}$$

Для определения указанных постоянных следует умножить правые и левые части уравнений (35) – (37) на произведение функций $(A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\cos(\theta)) j_v(r)$ и, используя свойство ортогональности присоединенных полиномов Лежандра и

функций Бесселя полуцелого порядка с весом $r^{-(v+1/2)}$ [15,16], а также селективные свойства δ -функций, проинтегрировать полученные выражения. Осуществляя подобную процедуру, вместо выражения (35) получаем следующее выражение:

$$\left\{ \begin{aligned} & \int_0^{2\pi} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) d\varphi \int_{-1}^1 P_v^n(x) \delta(x - x^*) dx \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha r)}{r^n} j_v(r) dr - \\ & - R_0 \exp(-\alpha R_0) \int_0^{2\pi} \delta(\varphi - \varphi^*) (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) d\varphi \int_{-1}^1 \delta(x - x^*) P_v^n(x) dx \int_{R_0}^{\infty} \frac{j_v(r)}{r^{n+1}} dr \end{aligned} \right\} = \\
= \pi \cos(\omega_c t) (A_{vn}^2 + B_{vn}^2) \|P_v^n(x)\|^2 \|j_v(r)\|^2.$$

В полученном выражении первое слагаемое в фигурных скобках оказывается равным нулю в силу равенства нулю первого сомножителя, представляющего собой инте-

грал по азимутальному углу φ , а вычисляя второе слагаемое получаем выражение (38); проводя аналогичную процедуру с выражением (36), получаем выражение (39):

$$\begin{aligned}
-P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[R_0 \exp(-\alpha R_0) (A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)) P_v^n(x^*) \int_{R_0}^{\infty} \frac{j_v(r)}{r^{n+1}} dr \right] = \\
= \pi \cos(\omega_c t) (A_{vn}^2 + B_{vn}^2) \|P_v^n(x)\|^2 \|j_v(r)\|^2,
\end{aligned} \tag{38}$$

$$P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\begin{aligned} & (A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)) \int_{-1}^1 P_v^n(x) dx \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha r)}{r^n} j_v(r) dr - \\ & - R_0 \exp(-\alpha R_0) (A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)) P_v^n(x^*) \int_{R_0}^{\infty} \frac{j_v(r)}{r^{n+1}} dr \end{aligned} \right] = \quad (39)$$

$$= \pi \cos(\omega_c t) (A_{vn}^2 + B_{vn}^2) \|P_v^n(x)\|^2 \|j_v(r)\|^2$$

Также, проводя аналогичную процедуру с выражением (37), находим равенство, в котором правая часть представляет собой вы-

ражение как в формулах (38), (39) при $t = 0$ ($\cos(\omega_c t) = 1$), а левая принимает вид выражения (40):

$$P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} (A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)) P_v^n(x^*) \int_{R_0}^{\infty} \left[\frac{\exp(-\alpha r)}{r^n} - \exp(-\alpha R_0) \frac{R_0}{r^{n+1}} \right] j_v(r) dr = \quad (40)$$

$$= \pi (A_{vn}^2 + B_{vn}^2) \|P_v^n(x)\|^2 \|j_v(r)\|^2$$

Из равенства правых частей выражений (38), (39) следует равенство их выражений в квадратных скобках в уравнении (41):

$$\left[-R_0 \exp(-\alpha R_0) (A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)) P_v^n(x^*) \int_{R_0}^{\infty} \frac{j_v(r)}{r^{n+1}} dr \right] =$$

$$= \left[\begin{aligned} & (A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)) \int_{-1}^1 P_v^n(x) dx \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha r)}{r^n} j_v(r) dr - \\ & - R_0 \exp(-\alpha R_0) (A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)) P_v^n(x^*) \int_{R_0}^{\infty} \frac{j_v(r)}{r^{n+1}} dr \end{aligned} \right]. \quad (41)$$

Из уравнения (41) следует, что $(A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)) = 0$, поскольку произведение $\int_{-1}^1 P_v^n(x) dx \cdot \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha r)}{r^n} j_v(kr) dr \neq 0$.

Откуда находим $A_{vn} = -B_{vn} \operatorname{tg}(n\varphi^*)$. Используя уравнение (40) получаем, что и

$(A_{vn}^2 + B_{vn}^2) = 0$. Из чего следует $B_{vn}^2 [\operatorname{tg}^2(n\varphi^*) + 1] = 0$ и, в конечном итоге, $B_{vn} = A_{vn} \equiv 0$, т.е. $P_2(r, \theta, \varphi, t) \equiv 0$. Таким образом, решение задачи (1) – (8) с учетом анизотропии излучения определяется решением (10) – (12) и описывается выражением (42):

$$P(r, \theta, \varphi, t) = P_{\text{изл}} R_0 \frac{\exp(-\alpha r)}{r} \delta(\theta - \theta^*) \delta(\varphi - \varphi^*). \quad (42)$$

В условиях эксперимента решение находят для некоторой заданной частоты $\omega_{\text{изл}}$, выбирая за основу выражение $[\exp(-\alpha r)/r]$, в котором в показатель экспоненты вводят поправочный коэффициент k , а знаменатель записывают с показателем n ($n \sim 1$) в виде r^n , измеряя давление излучения на различных

расстояниях от источника r_i , $i = 1 \dots N$, где N – число измерений [9]. Затем, обрабатывая полученные данные, находят оптимальные параметры (k_i^*, n_i^*) , которые и используют в практических целях с выбранной частотой $\omega_{\text{изл}}$.

Очевидно, что такой метод определения функции излучения ультразвука в морской среде будет достаточно надежен для заданных расстояний от источника, но может давать значительную погрешность при иной частоте излучения, требуя переопределения указанных параметров, что в общем случае указывает на неоднозначность и неудобство такого подхода к решению задачи.

Анализ результатов расчета

Решение (40) интересно тем, что представляя собой аналитическое выражение, характеризующее давление на водную среду (морскую воду) в зависимости от ее солёности $S(h)$, давления столба воды $P(h)$ и частоты излучения $\omega_{\text{изл}}$, позволяет получить оценку максимального расстояния r , на котором передача информации по ультразвуковому каналу будет осуществляться с относительной погрешностью δ при заданной частоте излучения и заданном направлении не хуже погрешности $\delta_{\text{ту}}$ приема-передачи информации ультразвуковым детектором, определенной техническими условиями, с учетом всех особенностей передачи информации в морской воде, о которых сообщалось ранее. Указанная величина представляет собой отношение (43):

$$(P_{\text{м}} - P_{\text{к}}) / P_{\text{м}} \leq \delta_{\text{ту}}, \quad (43)$$

где $\delta_{\text{ту}}$ – погрешность приема-передачи, определенная техническими условиями, $P_{\text{м}}$ – давление ультразвука на максимальном расстоянии от источника (на пределе чувствительности ультразвукового детектора); $P_{\text{к}}$ – давление ультразвука на критическом расстоянии от источника.

На рисунке 8 приводится семейство кривых ультразвукового давления на водную среду $P(r, \theta, \varphi, t)$ как функции и расстояния r в направлении излучения, определяемого углами $\theta = \theta^*$ и $\varphi = \varphi^*$, при различной частоте излучения $\omega_{\text{изл}}$ (кГц). Зависимость давления от солёности среды $S(h)$ носит незначительный характер и наблюдается лишь в третьем знаке после запятой при низких частотах.

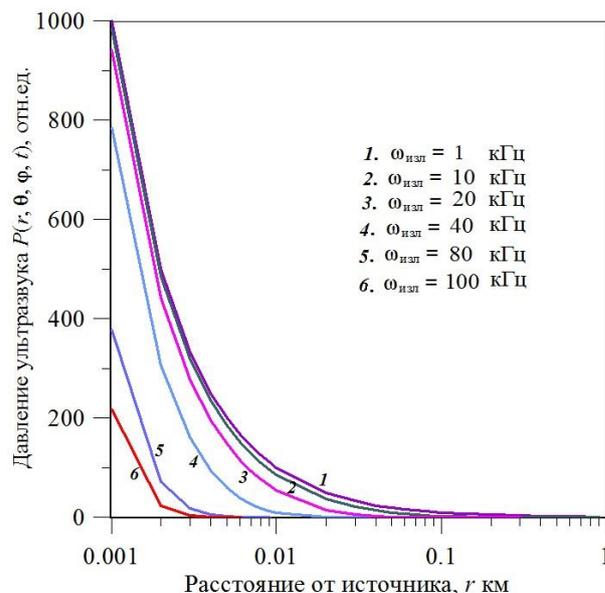


Рисунок 8. Зависимость давления ультразвукового излучения детектора как функция расстояния от источника. Параметром служит частота излучения $\omega_{\text{изл}}$: 1 кГц – (1), 10 кГц – (2), 20 кГц – (3), 40 кГц – (4), 80 кГц – (5), 100 кГц – (6)

Figure 8. Dependence of ultrasonic radiation pressure of the detector as a function of distance from the source. The parameter is the frequency of radiation ω_{rad} : 1 kHz – (1), 10 kHz – (2), 20 kHz – (3), 40 kHz – (4), 80 kHz – (5), 100 kHz – (6)

Из представленных зависимостей следует, что наибольшее расстояние r , на которое распространяется ультразвуковое излучение источника при указанной частоте излучения (1 кГц) составляет 1 км, что соответствует требованиям, выдвигаемым к реальным условиям работы макета ПДК при оценке $P_{\text{к}}$. С ростом частоты излучение быстро затухает, что согласуется с известными экспериментальными данными: на 300 м ($\omega_{\text{изл}} = 10$ кГц), 100 м ($\omega_{\text{изл}} = 20$ кГц), 30 м ($\omega_{\text{изл}} = 40$ кГц), 9 м ($\omega_{\text{изл}} = 80$ кГц) и 4 м ($\omega_{\text{изл}} = 100$ кГц).

С ростом мощности излучения при узкой диаграмме направленности (рис. 9) можно ожидать вполне надежной связи при передаче информации предлагаемым методом даже с учетом погрешности измерения, определяющей максимальное расстояние передачи информации.

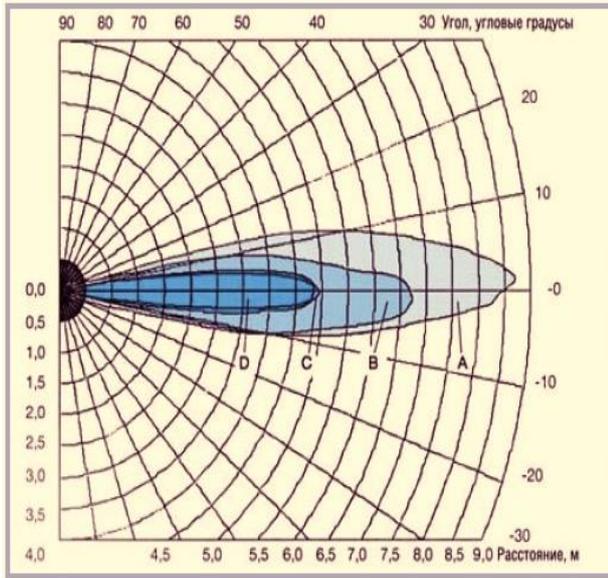


Рисунок 9. Пример реальной диаграммы направленности ультразвукового датчика излучения UJ400-FP-H12. A, B, C, D – Зоны чувствительности для разных измеряемых объектов [17]

Figure 9. Example of real directional diagram of ultrasonic radiation sensor UJ400-FP-H12. A, B, C, D – Sensitivity zones for different measured objects [17]

Таким образом, решение задачи (1) – (8) дает наглядное представление об особенностях прохождения ультразвукового сигнала с частотой излучения $\omega_{\text{изл}}$ в морской воде, характеризующейся соленостью $S(h)$. Вместе с тем, следует отметить, что представленная выше задача не вполне отвечает реальным условиям, которые определяются тем, что излучение ультразвукового детектора осуществляется с поверхности детектора радиуса r_0 , как указывалось ранее, и характеризуется определенным угловым раствором с генеральным направлением, определяемым углами $\theta = \theta^*$ и $\varphi = \varphi^*$, заданными, как и в первом случае (см. табл. 1).

Поэтому авторы считают целесообразным получить решение, которое следует из уравнения (1), но с граничными условиями, характеризующимися диаграммой рассеяния излучения в виде произведения единичных функций, определяющих излучение с поверхности детектора радиусом R_0 (44) и $r = \infty$ (45); в широтном диапазоне углов граничное условие представим в виде выражения (46):

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{r=R_0} = P_0(r)|_{r=R_0} \cdot [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)] [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)], \quad (44)$$

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{r=\infty} = 0, \quad (45)$$

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2} = P_0(r) [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)], \quad (46)$$

где $0 \leq \theta_1 < \pi/2; \theta_1 < \theta_2; 0 \leq \theta_2 < \pi/2$, $\theta_1 = \theta^* - \Delta\theta$, $\theta_2 = \theta^* + \Delta\theta$, $\Delta\theta = \arcsin(r_0/R_0)$, а угол θ^* определяется детектором согласно выбору оптимального направления (см. табл. 1 и рис. 10). Последнее означает, что широтные значения углов θ_1 и θ_2 ультразвукового излучения также, как и в первом случае, лежат в верхней полусфере области их определения, поскольку, согласно условиям задачи $P(r, \theta, \varphi, t) \equiv 0$ при $\theta \geq \pi/2$ (см. рис. 10). Для азимутального (меридиональ-

ного) направления граничное условие представим в виде (47):

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2} = P_0(r) [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)], \quad (47)$$

где $0 \leq \varphi_1 \leq \pi; \pi \leq \varphi_2 \leq 0; \varphi_1 < \varphi_2$ и $\varphi_1 = \varphi^* - \Delta\varphi$, $\varphi_2 = \varphi^* + \Delta\varphi$, $\Delta\varphi = \arcsin(r_0/R_0)$, а угол φ^* определяется детектором по оптимальному направлению (см. табл. 1 и рис. 11).

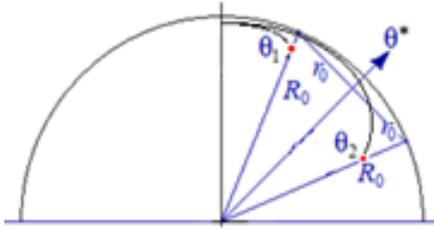


Рисунок 10. Условие излучения ультразвукового детектора из подводного положения в широтном направлении

Figure 10. Ultrasonic detector radiation condition from underwater position in latitudinal direction

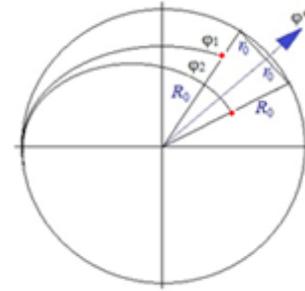


Рисунок 11. Условие излучения ультразвукового детектора из подводного положения в азимутальном направлении

Figure 11. Condition of radiation of the ultrasonic detector from the underwater position in the azimuthal direction

Начальные условия определяются выражениями (48), (49):

$$P(r, \theta, \varphi, t)|_{t=0} = P_0(r) [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)] \times [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)], \quad (48)$$

$$\frac{dP}{dt}(r, \theta, \varphi, t)|_{t=0} = 0. \quad (49)$$

Как и в первом случае представим искомую функцию $P(r, \theta, \varphi, t)$ в виде суммы,

аналогичной формуле (50):

$$P(r, \theta, \varphi, t) = P_3(r) + P_4(r, \theta, \varphi, t), \quad (50)$$

в которой для функции $P_3(r)$ ставится задача (51) – (53):

$$\Delta P_3 = 0, \quad (51)$$

где Δ указанный ранее оператор Лапласа в сферической геометрии.

Граничные условия, определяющие значения постоянных коэффициентов решения уравнения (51), представлены выражениями (52) и (53):

$$P_3(r)|_{r=R_0} = P_0(R_0) [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)] [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)], \quad (52)$$

$$P_3(r)|_{r=\infty} = 0, \quad (53)$$

Решение уравнения (51) определяется выражением (54):

$$P_3(r) = P_{\text{изл}} \frac{R_0}{r} \exp(-\alpha R_0) [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)] [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)], \quad (54)$$

в котором произведение единичных функций в квадратных скобках указывает на угловую ограниченность распространения ультразвукового излучения и также пред-

ставляют собой аналог диаграммы рассеяния ультразвукового излучения.

Функция $P_4(r, \theta, \varphi, t)$ будет описываться уравнением (55), подобным уравнению (13):

$$-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P_4}{\partial t^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial P_4}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left[\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial P_4}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 P_4}{\partial \varphi^2} \right) \right] = 0, \quad (55)$$

с аналогичными граничными условиями (56), (57), (58), (59):

$$P_4(r, \theta, \varphi, t)|_{r=R_0} = 0, \quad (56)$$

$$P_4(r, \theta, \varphi, t)|_{r=\infty} = 0, \quad (57)$$

которые определяют возможность получения собственных значений для собственных функций, определяющих решение уравнения (55);

$$P_4(r, \theta, \varphi, t)|_{\theta} = P_0(r)[\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)] - P_3(r), \quad (58)$$

$$P_4(r, \theta, \varphi, t)|_{\varphi} = P_0(r)[\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)] - P_3(r) \quad (59)$$

и начальными условиями (60), (61):

$$P_4(r, \theta, \varphi, t)|_{t=0} = P_0(r)[\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)] \times [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)] - P_3(r), \quad (60)$$

$$\frac{dP_4}{dt}(r, \theta, \varphi, t)|_{t=0} = 0. \quad (61)$$

Далее, применяя процедуру разделения переменных и подставляя в формулу (55) функцию $P_2(r, \theta, \varphi, t) = e^{i\omega_c t} V(r) Y(\theta, \varphi)$, где i – мнимая единица, ω_c – собственная частота переноса излучения (c^{-1}) ($\omega_c = c_0/R_0$ и $\omega_c \neq \omega_{изл}$), приходим к выражению, полученному ранее:

$$\frac{\omega_c^2}{c^2} V(r) Y(\theta, \varphi) + \frac{Y(\theta, \varphi)}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{V(r)}{r^2} \left[\frac{1}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin(\theta) \frac{\partial Y(\theta, \varphi)}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2(\theta)} \left(\frac{\partial^2 Y(\theta, \varphi)}{\partial \varphi^2} \right) \right] = 0.$$

Произведение функций $V(r) Y(\theta, \varphi)$, как и в первом случае представляет собой выражение (33), а использование начальных

условий также позволяет получить окончательное решение в виде выражения (62):

$$P_4(r, \theta, \varphi, t) = \sqrt{\frac{\pi}{2r}} \cos(\omega_c t) \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r), \quad (62)$$

в котором коэффициенты A_{vn} и B_{vn} подлежат определению. С этой целью запишем значение интеграла от присоединенных полино-

мов Лежандра на половине интервала его определения $0 \leq \theta \leq \pi/2$ в выражении (63), [14]:

$$\int_0^a x^{\alpha-1} P_v^n \left(\frac{x}{a} \right) dx = 2^{2n-1} \sqrt{\pi} a^\alpha \Gamma \left[\frac{\alpha/2}{(1-n)/2, 1+(\alpha-n)/2} \right] \times {}_3F_2 \left(\frac{v-n+1}{2}, -\frac{n+v}{2}, 1-\frac{n}{2}; 1-n, 1+\frac{\alpha-n}{2}; 1 \right) [a, Re \alpha > 0; Re n < 2] \quad (63)$$

где $\Gamma \left[\frac{\alpha/2}{(1-n)/2, 1+(\alpha-n)/2} \right]$ – гамма-функция;

${}_3F_2 \left(\frac{v-n+1}{2}, -\frac{n+v}{2}, 1-\frac{n}{2}; 1-n, 1+\frac{\alpha-n}{2}; 1 \right)$ – гипергеометрическая функция Гаусса [14].

В условиях настоящей задачи $\alpha = 1$, а верхний предел a , в интегральном выраже-

нии (61), определяется значениями $x_1 = \cos(\theta_1)$ или $x_2 = \cos(\theta_2)$, при x определенном на интервале $1 \leq x \leq 0$. Используя фор-

мулу (60) и выражения, определяющие граничные условия (58) – (60) для функции $P(r, \theta, \varphi, t)$, получаем выражения (64) – (66):

$$P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)] \left[r^{1/2} \exp(-\alpha r) - \frac{R_0}{r^{1/2}} \exp(-\alpha R_0) [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)] \right] =$$

$$= \cos(\omega_c t) \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r), \quad (64)$$

$$P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)] \left[r^{1/2} \exp(-\alpha r) - \frac{R_0}{r^{1/2}} \exp(-\alpha R_0) [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)] \right] =$$

$$= \cos(\omega_c t) \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r), \quad (65)$$

$$P_{\text{изл}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)] [\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)] \left[\exp(-\alpha r) r^{1/2} - \frac{R_0}{r^{1/2}} \exp(-\alpha R_0) \right] =$$

$$= \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{n=-v}^{+v} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r). \quad (66)$$

Для определения постоянных A_{vn} и B_{vn} в формулах (64) – (66) следует умножить левую и правую их части на произведение $(A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) P_v^n(\theta) j_v(r)$ и, используя свойство ортогональности присоединенных полиномов Лежандра и функций Бесселя с весом $r^{-(v+1/2)}$ [15,16], проинтегри-

ровать полученные выражения по углам θ и φ , используя формулу (61), а левую по соответствующим углам в пределах действия единичных функций. Таким образом, после проведения соответствующих процедур вместо выражений (64) – (66), принимая за $x = \cos(\theta)$ и $x_1 = \cos(\theta_1)$, $x_2 = \cos(\theta_2)$, имеем уравнение (67):

$$\int_0^{2\pi} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) d\varphi \int_{x_1}^{x_2} P_v^n(x) dx \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha r)}{r^v} j_v(r) dr -$$

$$- \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) d\varphi \int_{x_1}^{x_2} P_v^n(x) dx R_0 \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha R_0)}{r^{v+1}} j_v(r) dr =$$

$$= \cos(\omega_c t) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(A_{vn}^2 + B_{vn}^2)}{P_{\text{изл}}} \int_{-1}^1 [P_v^n(x)]^2 dx \int_{R_0}^{\infty} \|j_v\|^2 dr. \quad (67)$$

В полученном выражении интеграл первого сомножителя первого слагаемого в левой части уравнения (67) равен нулю $\left(\int_0^{2\pi} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) d\varphi = 0 \right)$, интеграл

первого сомножителя второго слагаемого левой части этого уравнения определяется следующей формулой:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi)) d\varphi = \frac{2}{n} \sin[n\Delta\varphi^*] [A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)],$$

а интеграл от квадрата угловой части в правой части формулы (67), определяется соответственно формулой:

$$\int_0^{2\pi} (A_{vn} \cos(n\varphi) + B_{vn} \sin(n\varphi))^2 d\varphi = \pi(A_{vn}^2 + B_{vn}^2),$$

$$\begin{aligned} & - [A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)] \int_{x_1}^{x_2} P_v^n(x) dx R_0 \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha R_0)}{r^{v+1}} j_v(r) dr = \\ & = \frac{\cos(\omega_c t)}{2 \sin[n\Delta\varphi^*]} n\pi \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(A_{vn}^2 + B_{vn}^2)}{P_{\text{изл}}} \int_{-1}^1 [P_v^n(x)]^2 dx \int_{R_0}^{\infty} \|j_v\|^2 dr, \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} & \left[A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*) \right] \left(\int_0^1 P_v^n(x) dx \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha r)}{r^v} j_v(r) dr - \int_{x_1}^{x_2} P_v^n(x) dx R_0 \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha R_0)}{r^{v+1}} j_v(r) dr \right) = \\ & = \frac{\cos(\omega_c t)}{2 \sin[n\Delta\varphi^*]} n\pi \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(A_{vn}^2 + B_{vn}^2)}{P_{\text{изл}}} \int_{-1}^1 [P_v^n(x)]^2 dx \int_{R_0}^{\infty} \|j_v\|^2 dr, \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} & [A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)] \int_{x_1}^{x_2} P_v^n(x) dx \int_{R_0}^{\infty} \left[\frac{\exp(-\alpha r)}{r^v} - R_0 \frac{\exp(-\alpha R_0)}{r^{v+1}} \right] j_v(r) dr = \\ & = \frac{n\pi}{2 \sin[n\Delta\varphi^*]} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(A_{vn}^2 + B_{vn}^2)}{P_{\text{изл}}} \int_{-1}^1 [P_v^n(x)]^2 dx \int_{R_0}^{\infty} \|j_v\|^2 dr. \end{aligned} \quad (70)$$

Из равенства правых частей выражений (68), (69) следует равенство и левых, что дает: $[A_{vn} \cos(n\varphi^*) + B_{vn} \sin(n\varphi^*)] = 0$, поскольку произведение $\int_0^1 P_v^n(x) dx \int_{R_0}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha r)}{r^v} j_v(r) dr \neq 0$, откуда следует $A_{vn} = -B_{vn} \operatorname{tg}(n\varphi^*)$. Из последнего следует и равенство нулю правой части уравнения (70), т.е. $(A_{vn}^2 + B_{vn}^2) = 0$. Действительно, $B_{vn}^2 (1 + \operatorname{tg}^2(\varphi^*)) = 0$, откуда и следует,

где A_{vn} и B_{vn} – коэффициенты, подлежащие определению, тогда вместо выражений (64) – (66) находим выражения (68) – (70):

что $A_{vn} = B_{vn} = 0$. Таким образом, пришли к ранее полученному результату, т.е. радиальное распределение ультразвукового излучения будет иметь аналогичный характер, что и в выражении (42), но угловая часть будет определяться произведением единичных функций $[\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)][\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)]$, что и будет отличать полученное решение от предыдущего выражением (71):

$$P(r, \theta, \varphi, t) = P_{\text{изл}} R_0 \frac{\exp(-\alpha r)}{r} [\eta(\varphi - \varphi_1) - \eta(\varphi - \varphi_2)][\eta(\theta - \theta_1) - \eta(\theta - \theta_2)]. \quad (71)$$

Заключение

Анализ представленных решений задачи прохождения ультразвукового излучения в глубоководных акваториях показал, что конечный результат не противоречит экспери-

менты, позволяющие обеспечить наиболее надежную связь оператора с ПДК, что, в конечном итоге, позволит оперативнее решать задачи радиационного контроля донных отложений. Кроме того, вы-

ментальным методам определения характера рассматриваемой задачи, приведенной в работе [9]. Полученная зависимость $P(\omega_{\text{изл}})$ позволяет предварительно выбрать диапазон частот, которые целесообразно использовать для решения проблем, связанных с переносом информации в глубоководных акваториях: сформулировать требования к основным параметрам ультразвуковых датчиков, такие как выбор длины, диаметра, веса детектора; диаграммы направленности, мощности излучения и т.д., т.е. выбрать ультразвуковые

бор ультразвуковых детекторов, обладающих такими свойствами, даст возможность разработать звуковой способ связи в условиях глубоководных акваторий, что сыграет значительную роль при решении проблем передачи информации для специалистов, но, очевидно, приведет к необходимости как разработки специального программного обеспечения, так и создания особого языка при передаче информации в силу ограниченности частотного диапазона, используемого человек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пыркков И.В., Коротков А.С., Тихонов И.И. Разработка и апробация метода радиационного контроля донных отложений IN STU на основе погружного полупроводникового гамма-спектрометра. *Экологические системы и приборы*. 2010;9:15–18. Режим доступа: <http://eco.tgizd.ru/ru/arhiv/620> (дата обращения: 10.03.2024).

Pyrkov I.V., Korotkov A.S., Tikhonov I.I. Development and testing of the method of radiation-monitoring of bed slit IN STU-established on the basis of an immersible semiconducting γ -spectrometer. *Ecological systems and devices*. 2010;9:15–18. (In Russ.). Available at: <http://eco.tgizd.ru/ru/arhiv/620> (accessed: 10.03.2024).

2. Pavel P. Povineca, Iolanda Osvatha, Jean-François Comanducci. Underwater gamma-ray spectrometry. *Radioactivity in the environment*. 2008;11:449–479. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(07\)11014-7](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(07)11014-7)

3. Елохин А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды. Монография. Москва: НИЯУ МИФИ, 2014. 520 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vcmbnp> (дата обращения: 10.03.2024).

Elokhin A.P. Methods and means of environmental radiation control systems. Monografia. Moscow: NRU MPhI, 2014. 520 p. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vcmbnp> (accessed: 10.03.2024).

4. Елохин А.П., Ксенофонтов А.И., Пыркков И.В. Основы экологии и радиационно-экологического контроля окружающей среды. Москва: НИЯУ МИФИ, 2018. 680 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ysaddx> (дата обращения: 10.03.2024).

Elokhin A.P., Ksenofontov A.I., Pyrkov I.V. Fundamentals of ecology and radiation and environmental control. Moscow: NRNU MPhI, 2018. 680 p. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ysaddx> (accessed: 10.03.2024).

5. Елохин А.П., Василенко А.А., Улин С.Е., Юксеклер С., Юксеклер М. Исследование системы автоматизированного управления подводного дозиметрического комплекса при дистанционном измерении придонной радиоактивности в глубоководных акваториях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;3:18–39. Режим доступа: <https://doi.org/10.26583/GNS-2020-03-02>

Elokhin A.P., Vasilenko A.A., Ulin S.E., Yuksekler S., Yuksekler M. Investigation of the automated control system of an underwater dosimetric complex for remote measurement of bottom-level radioactivity in deep-water areas. *Global nuclear safety*. 2020;3:18–39. (In Russ.). Available at: <https://doi.org/10.26583/GNS-2020-03-02>

6. Елохин А.П., Улин С.Е. Способ и система получения данных придонной радиоактивности в глубоководных акваториях. Патент на Изобретение №2739136. Приоритет от 08.06.2020. Бюл. №36 от 21.12.20. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002739136_20201221_C1_RU/ (дата обращения: 10.03.2024).

Elokhin A.P., Ulin S.E. Method and system for obtaining data on bottom radioactivity in deep-water areas. Patent for Invention No. 2739136. Priority dated 06/08/2020. Byul. No. 36 dated 21.12.20. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002739136_20201221_C1_RU/ (accessed: 10.03.2024).

7. Елохин А.П., Улин С.Е., Василенко А.А. Метод определения и передачи данных радиоактивного загрязнения донной поверхности в глубоководных акваториях. *Атомная энергия*. 2021;130(6):338–344. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4437> (дата обращения: 10.03.2024).

8. Elokhin A.P., Ulin S.E., Vasilenko A.A. Method for determining and transmitting data on radioactive contamination of the sea-bottom in deep-water areas. *Atomic energy*. 2021;130:360–366. <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00824-0>

9. Лепендин Л.Ф. Акустика. Москва: Высшая школа, 1978. 448 с. Режим доступа: <https://alexandr4784.narod.ru/lependin.html> (дата обращения: 10.03.2024).

Lependin L.F. Acoustics. Moscow: Higher School. 1978, 448 p. (In Russ.). Available at: <https://alexandr4784.narod.ru/lependin.html> (accessed: 10.03.2024).

10. Деев М.Г. Мировой океан: основные параметры морской воды. *География*. 2009;20:7–12. Режим доступа: https://geo.1sept.ru/view_article.php?ID=200902003 (дата обращения: 10.03.2024).

Deev M.G. World Ocean: basic parameters of sea water. *Geography*. (In Russ.). Available at: https://geo.1sept.ru/view_article.php?ID=200902003 (accessed: 10.03.2024).

11. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. III, ч 2. Москва: Наука, 1974. 672 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/DLsGTR1sYqKaR?ysclid=lyo4umrlcm9131925> (дата обращения: 10.03.2024).

Smirnov V.I. Course of higher mathematics. Volume III, part two. Moscow: Nauka, 1974. 672 p. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/DLsGTR1sYqKaR?ysclid=lyo4umrlcm9131925> (accessed: 10.03.2024).

12. Справочник по специальным функциям. Под редакцией М. Абрамовица и И. Стигана. Москва: Наука, 1979. 832 с. Режим доступа: <https://archive.org/details/B-001-038-574-ALL/B-001-038-574-06/page/444/mode/2up> (дата обращения: 10.03.2024).

A guide to special functions. Edited by M. Abramovitz and I. Stigan. Moscow: Nauka, 1979. 832 p. (In Russ.). Available at: <https://archive.org/details/B-001-038-574-ALL/B-001-038-574-06/page/444/mode/2up> (accessed: 10.03.2024).

13. Соболев С.Л. Уравнения математической физики. Москва: Наука, 1966. 444 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/jym6J9VmkcRfQ?ysclid=lyo58vfj3928834074> (дата обращения: 10.03.2024).

Sobolev S.L. Equations of mathematical physics. Moscow: Nauka, 1966. 444 p. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/jym6J9VmkcRfQ?ysclid=lyo58vfj3928834074> (accessed: 10.03.2024).

14. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Дополнительные главы. Москва: Наука, 1986. 800 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/SAOumBJKxiLEt?ysclid=lyo5h9ts1b966588688> (дата обращения: 10.03.2024).

Prudnikov A.P., Brychkov Yu.A., Marichev O.I. Integrals and series. Additional chapters. Moscow: Nauka, 1986. 800p. (In Russ.). Available at: <https://djvu.online/file/SAOumBJKxiLEt?ysclid=lyo5h9ts1b966588688> (accessed: 10.03.2024).

15. Дегтярев А.Н. Дополнительные свойства специальных функций. Севастопольский национальный технический университет. Прикладная математика. 2006. С. 1–10. Режим доступа: <https://znanium.ru/catalog/document?id=283503> (дата обращения: 10.03.2024).

Degtyarev A.N. Additional properties of special functions. Sevastopol National Technical University. Applied mathematics. 2006. P. 1–10. (In Russ.). Available at: <https://znanium.ru/catalog/document?id=283503> (accessed: 10.03.2024).

16. Холодова С.Е., Перегудин С.И. Специальные функции в задачах математической физики. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. 72 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/43459?ysclid=lyo5ux8j1s918829395> (дата обращения: 10.03.2024).

Kholodova S.E., Peregudin S.I. Special functions in problems of mathematical physics. – St. Petersburg: ИТМО Research Institute, 2012. 72 p. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/43459?ysclid=lyo5ux8j1s918829395> (accessed: 10.03.2024).

17. Жданкин В.К. Ультразвуковые датчики для систем управления. *Современные технологии автоматизации*. 2002(3):46–47. Режим доступа: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/apparatnye-sredstva/125352/> (дата обращения: 10.03.2024).

Zhdankin V.K. Ultrasonic sensors for control systems. Modern technologies of automation. 2002.(3):46–47. (In Russ.). Available at: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/apparatnye-sredstva/125352/> (accessed: 10.03.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Елохин А.П. – написание статьи, математическая реализация решения задачи, участие в проведении эксперимента;

Улин С.Е. – постановка задачи, редактирование текста и участие в проведении эксперимента;

Шустов А.Е. – проведение эксперимента;

Свешников Н.М. – анализ технологий ультразвуковых детекторов и выбор наиболее оптимальных образцов для рассматриваемых задач.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Прокопьевич Елохин, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», член-корреспондент РАН, г. Москва, Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

WoS ResearcherID: F-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Сергей Евгеньевич Улин, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-6737-7070>

e-mail: seulin@gmail.com

Александр Евгеньевич Шустов, старший преподаватель, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-9795-3753>

e-mail: aeshustov@mephi.ru

Свешников Никита Максимович, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: NMSveshnikov@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Elokhin A.P. – writing a paper, mathematical implementation of the problem solution, participation in the experiment;

Ulin S.E. – setting the problem, editing the text, and participating in the experiment;

Shustov A.E. – conducting an experiment.

Sveshnikov N.M. – analysis of ultrasonic detector technologies and selection of the most optimal samples for the considered tasks.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Alexander P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate Member of Russian Academy of Natural Sciences, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

WoS ResearcherID: F-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Sergey E. Ulin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-6737-7070>

e-mail: seulin@gmail.com

Alexander E. Shustov, Senior Lecturer, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-9795-3753>

e-mail: aeshustov@mephi.ru

Sveshnikov Nikita M., postgraduate student, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: NMSveshnikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024

После доработки 25.07.2024

Принята к публикации 30.07.2024

Received 12.03.2024

Revision 25.07.2024

Accepted 30.07.2024

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

УДК 621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-02>

EDN DJTPUM

Оригинальная статья / Original paper



**О разработке нового поколения средств передачи и представления
важной для безопасности АЭС технологической информации**

Е.В. Воробьев¹ , Г.Д. Новоселов¹, П.В. Поваров¹  ,
Л.В. Цыхлер¹ , А.Ю. Злобин²

¹НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл.,
Российская Федерация

²АО «КОНСИСТ-ОС» «Волгодонский», г. Волгодонск-28, Ростовская обл., Российская Федерация
 povarovp@yandex.ru

Аннотация. В статье показана, с учетом безопасности эксплуатации как наивысшего приоритета, важность дополнительных средств информационного сопровождения эксплуатации АЭС и привлечения центров технической поддержки и управления кризисными ситуациями. Для этих целей на всех российских АЭС применяются решения, позволяющие получать доступ к информации о работе оборудования АЭС за пределами АСУТП. Основным потребителем такой информации является кризисный центр АО «Концерн Росэнергоатом», возможности которого позволяют регулярно проводить учения с моделированием нештатных ситуаций на АЭС и отработкой действий персонала. В последнее время в России произошли существенные изменения на рынке операционных систем, выпущен ряд нормативных документов, включающих дополнительные с точки зрения информационной безопасности требования к получению информации от АСУТП. Ростовская АЭС более 20 лет успешно эксплуатирует систему представления технологических параметров, которая обеспечивает в режиме реального времени персонал инженерной поддержки эксплуатации и кризисные центры всей необходимой информацией о безопасности энергоблоков. На примере Ростовской АЭС показана необходимость разработки нового поколения средств передачи и представления технологической информации АСУТП энергоблоков АЭС. Рассмотрены возможные варианты преодоления существующих ограничений, а также предложен сценарий разработки и внедрения средств передачи и представления технологической информации на Ростовской АЭС, включающих ряд специфических функций. Опыт Ростовской АЭС по разработке нового поколения средств передачи и представления важной для безопасности АЭС технологической информации может быть тиражирован на другие российские АЭС.

Ключевые слова: АСУТП, передача данных, технологические параметры, информационная безопасность, SCADA.

Для цитирования: Воробьев Е.В., Новоселов Г.Д., Поваров П.В., Цыхлер Л.В., Злобин А.Ю. О разработке нового поколения средств передачи и представления важной для безопасности АЭС технологической информации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):27–34. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-02>

For citation: Vorobiev E.V., Novoselov G.D., Povarov P.V., Tsykhler L.V., Zlobin A.Y. New data transfer and display system development for NPP safety. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):27–34. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-02>

New data transfer and display system development for NPP safety

Egor V. Vorobiev ¹ , Grigory D. Novoselov ¹, Prokhor V. Povarov ¹  ,
Lev V. Tsykhler ¹ , Alexander Y. Zlobin ²

¹*SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch
of National Research Nuclear University «MEPhI»*

²*KONSIST-OS JSC, Volgodonsk-28, Rostov region, Russian Federation*
 povarovp@yandex.ru

Abstract. The article shows the importance of additional information support for the NPP operation and emergency and crisis control centers involvement taking into account the safety of operation as the highest priority. Emergency control tools used at Russian nuclear power plants allows to obtain the nuclear power plant operational information outside the automated control system for these purposes. The main consumer of such information is the JSC Rosenergoatom Concern Crisis Center, its capabilities allow regular exercises with modeling of emergency situations at nuclear power plants and working out the actions of personnel. There have been significant changes in the operating systems market in Russia recently, a number of regulatory documents have been issued that include additional requirements from the point of view of information security to obtain data from automated control systems. Rostov NPP has been successfully operating a system of process parameter presentation for more than 20 years, it provides the operation engineering support personnel and crisis centres with all necessary information on the safety of power units in real time. Considering the Rostov NPP experience, the need to develop a new generation of means of transmitting and presenting technological information to the automated control systems of NPP power units is shown. Possible options to overcome the existing limitations are considered in the paper. It proposes a scenario of development and implementation of means of transmission and presentation of technological information at Rostov NPP, including a number of specific functions. The Rostov NPP experience in developing a new generation of means of important technology information transmission and presentation can be replicated at other Russian nuclear power plants.

Keywords: emergency control center, automatic control system of technological process, data transfer, technological parameters, information security, SCADA.

Одной из стратегических целей АО «Концерн Росэнергоатом» является эффективное снабжение потребителей электроэнергией, производимой на АЭС, при этом наивысшим приоритетом деятельности является безопасность. Средства управления оборудованием и технологическими процессами с целью обеспечения надежной и безопасной эксплуатации АЭС объединены в АСУ ТП.

После чернобыльской катастрофы в СССР занялись повышением безопасности ядерных объектов и организацией дополнительных структур для оказания помощи и поддержки действующим АЭС в любой кризисной ситуации. Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР в 1987 г. создана группа оказания экстренной помощи атомным станциям (ОПАС). Был изучен весь открытый международный опыт по созданию аналогичных центров, атомщики несколько лет тесно сотрудничали с ЦУПом (Центр управления полетами), посетили все

ведущие мировые центры атомной энергетики для детального изучения мирового опыта противоаварийного планирования и аварийного реагирования.

В результате с 2000 г. в одном здании с ВНИИАЭС функционирует Кризисный центр АО «Концерн «Росэнергоатом» (КЦ РЭА), который служит базой для группы ОПАС и обеспечивает оперативный приём, обработку и передачу информации, для оказания экстренной помощи атомным станциям в случае аварийных ситуаций.¹

Для поддержания готовности к оперативному реагированию на любые отклонения,

¹ НП-005-16 Положение о порядке объявления аварийной обстановки, оперативной передачи информации и организации экстренной помощи атомным станциям в случаях радиационно-опасных ситуаций. – Режим доступа: <http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/%D0%9D%D0%9F-005-16.pdf> (дата обращения: 03.06.2024).

угрожающие безопасной эксплуатации, на российских АЭС регулярно проводятся противоаварийные тренировки и учения. Самыми масштабными по количеству вовлечённого персонала и организаций являются комплексные противоаварийные учения (КПУ)².

Таким образом, передача технологической информации от АСУТП за пределы энергоблоков АЭС в центры технической поддержки и управления кризисными ситуациями стала важной и актуальной задачей. Решение этой задачи позволяет обеспечить необходимой информацией, помимо оперативного персонала АЭС, также персонал и организации, обеспечивающие техническую поддержку эксплуатации, руководство станции, внутренние и внешние кризисные центры.

На Ростовской АЭС с 2001 г. эксплуатируется Система Передачи Данных (СПД), обеспечивающая передачу технологической информации от АСУ ТП в локальную вычислительную сеть АЭС и далее – в кризисный центр концерна «Росэнергоатом» (КЦ РЭА). Помимо СПД был разработан и включён в Систему Представления Технологических Параметров (СПТП) комплекс программ по отображению текущих значений технологических параметров (StarGazer), а также по ведению (StarPacker) и обработке (StarView) архивной информации [1]. Эти программы включают мнемосхемы, формы отображения трендов и таблиц заданных параметров, возможности построения графиков, экспорта данных, сервисные и пользовательские функции [2] (рис. 1).

В настоящее время в России осуществляется последовательное принятие ряда мер по повышению уровня защищенности объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ)³ организаций, включая энерго-

блоки АЭС, входящих в АО «Концерн Росэнергоатом». Так как АСУТП энергоблоков АЭС относятся к КИИ, требуется существенная переработка действующей на Ростовской АЭС СПТП.

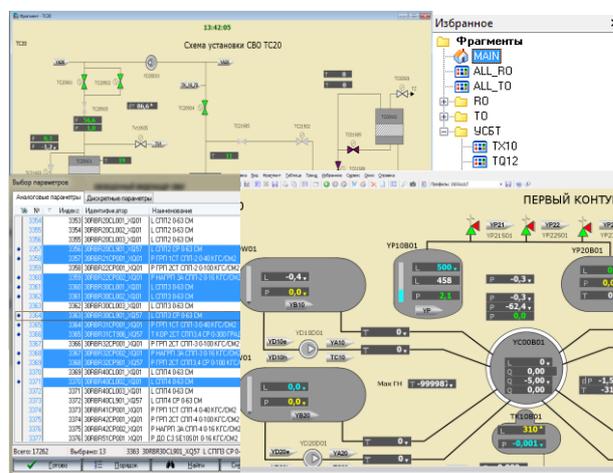


Рисунок 1. Экранные формы СПТП Ростовской АЭС

Figure 2. Interaction with the technology data network using virtual desktops (compiled by the authors)

Учитывая введённые в последнее время требования и ограничения, разработка нового поколения СПТП может осуществляться по одному из следующих вариантов.

- виртуализация рабочих столов;
- применение имеющихся на рынке решений на основе отечественных SCADA;
- разработка специализированного программного решения;

Решение задачи доступа к технологической информации АСУТП при помощи виртуализации рабочих столов на первый взгляд выглядит заманчиво. Тем более, что после ухода из России компании VMware и других крупнейших мировых поставщиков решений по виртуализации (Citrix XenDesktop, Windows Virtual Desktop и др), на российском рынке появился целый ряд продуктов: SpaceVM разработки «ДАКОМ М», SharxDesk от ООО «ШАРКС ДЦ», АССИСТЕНТ от ООО «САФИВ», ECP Veil

² На Ростовской АЭС завершились комплексные противоаварийные учения. – Режим доступа: <https://rusatom-energy.ru/media/rosatom-news/narostovskoy-aes-zavershilis-kompleksnye-protivoavariynye-ucheniya-/?ysclid=lzv0qvi3zk912785387> (дата обращения: 03.06.2024).

³ Федеральный закон от 26 июля 2017 г. N 187-ФЗ О безопасности критической информации

инфраструктуры Российской Федерации. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/42128> (дата обращения: 03.06.2024).

от АО «НИИ Масштаб» и др., к тому же некоторые из перечисленных продуктов получили лицензии ФСБ и сертифицированы ФСТЭК РФ.

Однако хотя технология виртуализации рабочих столов позволяет повысить уровень защищённости от ряда инцидентов в области

информационной безопасности, обеспечить надёжную передачу и представление технологической информации от АСУТП АЭС возможно только путём фактического соединения сегментов технологической сети передачи данных (ТСПД) и корпоративной сети передачи данных (КСПД) (рис. 2).

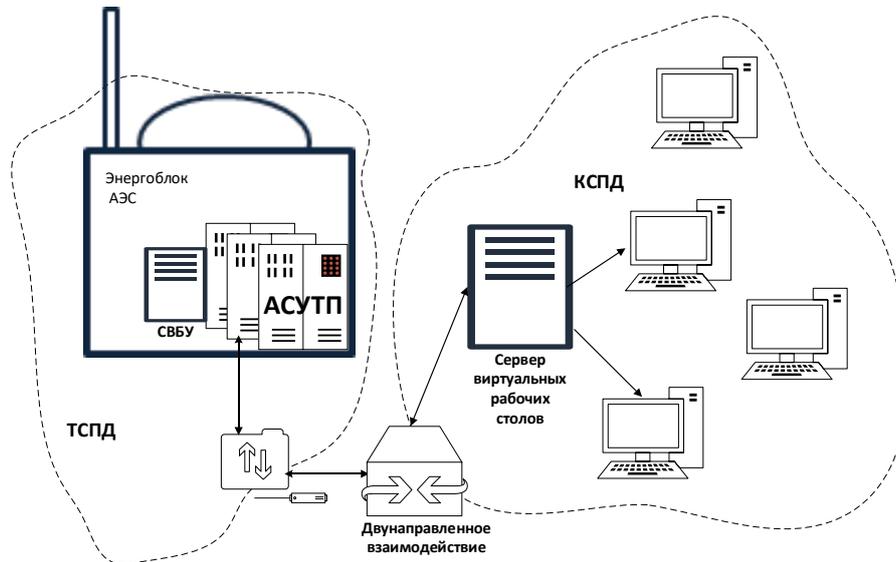


Рисунок 2. Взаимодействие с ТСПД с помощью виртуальных рабочих столов (составлено авторами)
Figure 2. Interaction with the technology data network using virtual desktops (compiled by the authors)

Как видно из рисунка 2, для работы инфраструктуры виртуальных рабочих столов на границе КСПД и ТСПД должен быть обеспечен двунаправленный обмен информацией, что противоречит требованиям, вводимым для обеспечения безопасности АСУТП АЭС, как значимого объекта КИИ.

Поэтому для доступа к технологической информации должны использоваться программно-технические средства, не только принципиально не позволяющие оказывать какое-либо воздействие на источник информации, которым является АСУТП, размещенная в пределах ТСПД, но и в принципе допускающие только одностороннюю передачу данных, например – через специализированные устройства однонаправленной передачи данных, сертифицированные российскими регуляторами.

Укрупненно структура с односторонней передачей данных от ТСПД в КСПД представлена на рисунке 3.

Такая схема взаимодействия ТСПД и КСПД позволяет организовать:

- систематическую выгрузку данных из критичных сегментов;
- исключить информационное воздействие на объекты ТСПД извне;
- исключить возможность управления объектами ТСПД.

Для реализации задач представления технологической информации могут служить SCADA-системы, выбор которых на отечественном ИТ-рынке достаточно широк: EISCADA, Альфа платформа, «КАСКАД», SEDMAX, StreamDat. Перечисленные SCADA-системы с успехом применяются в различных отраслях промышленности: химической, нефтехимической, газовой, металлургической и в других отраслях промышленности, в энергетике и ЖКХ.

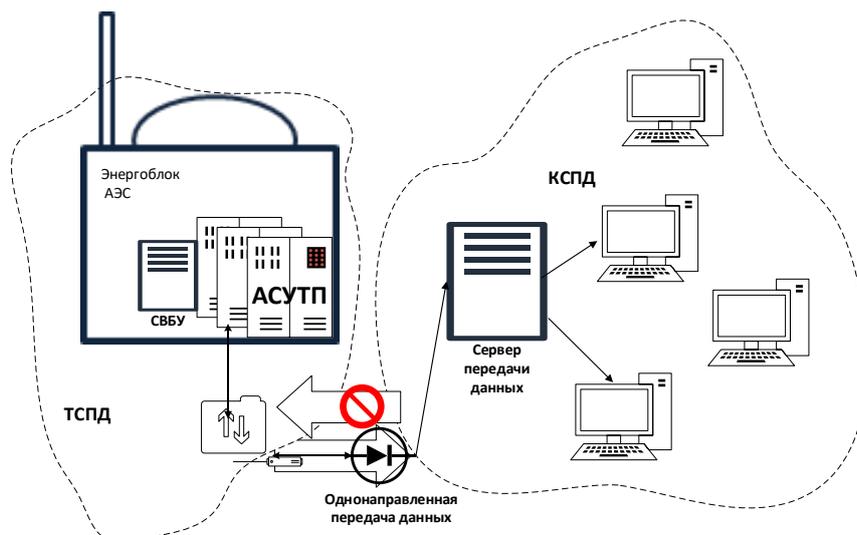


Рисунок 3. Взаимодействие с ТСПД через систему однонаправленной передачи данных (составлено авторами)

Figure 3. Interaction with the technological data network via unidirectional data transmission system (compiled by the authors)

Выбор конкретной отечественной SCADA-системы для замены СПТП Ростовской АЭС может осуществляться путём сравнения предлагаемых преимуществ в части стоимости внедрения и эксплуатации, быстродействия, надежности, возможности расширения функциональности, а также соответствия требованиям ФСБ и ФСТЭК.

Одним из вариантов для внедрения в качестве средства представления технологической информации от АСУТП АЭС является решение на платформе SEDMAX⁴, которое обеспечивает:

- работу на базе операционных систем семейства Linux (Astra Linux);
- автоматическую одностороннюю передачу данных от технологического сервера в корпоративный по протоколу S2S;
- систему разграничения прав и гибкую настройку ролей пользователей, в том числе по объектам внутри одного предприятия;
- использования защищенного протокола https для безопасного доступа.

Решения на платформе SEDMAX успешно внедрены на большом количестве российских промышленных и энергетических

предприятий, но универсальность платформы и её открытость может оказаться её недостатком, когда нужно обеспечить привязку к конкретному объекту со своими особенностями и специфическими требованиями к информационной безопасности и функционалу.

Например, в SCADA-системах разработки Siemens или Fanuc имелись определённые проблемы с информационной безопасностью, а также с быстродействием при просмотре архивов и построении графиков⁵. Реализация в этих системах дополнительного функционала оказывалась или совсем невозможной, или настолько сложной, что приводила к необходимости разработки отдельных программных модулей. При этом громоздкая интеграция дополнительных модулей с основной SCADA-системой и дальнейшее сопровождение их эксплуатации приводили к таким трудозатратам, что от дополнительных функций приходилось отказываться.

⁴ О системе SEDMAX. – Режим доступа: <https://sedmax.ru/sedmax/> (дата обращения: 03.06.2024).

⁵ Благодаря Positive Technologies устранены опасные уязвимости в SCADA-системах Siemens и Schneider Electric. – Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/news/474312.php?ysclid=m04zob7f4t502139179> (дата обращения: 03.06.2024).

Изучив закономерности внедрения и развития СПТП Ростовской АЭС, можно сделать вывод, что использование имеющихся на рынке в большей, или меньшей степени стандартизированных для потребностей ИТ-ранка систем предполагает дополнительные и весьма существенные риски утраты части востребованного функционала ⁶[3].

Разработка специализированного программного решения для замены СПТП Ростовской АЭС должна:

- обеспечить работу на базе операционных систем семейства Linux;
- обеспечить оптимальные параметры безопасности и быстродействия;
- реализовать специфические функции, отсутствующие в «готовых» продуктах;
- обеспечить совместимость с историческими данными СПТП Ростовской АЭС;
- реализовать функционал поэтапно, с последовательным отказом от исторических решений, реализованных в СПТП;
- обеспечить эффективную интеграцию со смежными системами;
- последовательно расширять функционал.

Надо иметь в виду, что при замене СПТП Ростовской АЭС возможно различное сочетание функционала специализированного решения и имеющихся на рынке «готовых» продуктов, а также дальнейшее тиражирование на другие АЭС в различных масштабах и сочетаниях. Например, комплекс организационных и технических мер на Ростовской АЭС, как объекте внедрения, обеспечивает требования по разделению ТСПД от КСПД, специально разработанное программное обеспечение заменит СПТП и обеспечит необходимый Ростовской АЭС функционал, а решение на базе SEDMAX может обеспечить оперативный прием, обработку и передачу информации в КЦ РЭА.

Поэтапный переход на новое поколение средств передачи и представления технологической информации АСУТП Ростовской АЭС может быть реализован в таком случае по следующему сценарию:

1. Принятие организационных и технических мер по защите ТСПД на Ростовской АЭС.

2. Разработка программных средств, обеспечивающих анализ поступающей от АСУТП Ростовской АЭС технологической информации.

3. Разработка программных средств формирования архива поступающей от АСУТП Ростовской АЭС технологической информации.

4. Разработка программных средств представления текущей технологической информации в форматах АСУТП Ростовской АЭС.

5. Разработка программных средств обмена технологической информацией АСУТП Ростовской АЭС со смежными системами (например, SEDMAX).

6. Расширение функционала, тиражирование.

Указанные этапы могут быть реализованы сначала для одного энергоблока с последующим тиражированием на каждый из четырех энергоблоков Ростовской АЭС, с учётом их особенностей.

Предоставление технологических данных от АСУТП Ростовской АЭС персоналу технической поддержки в режиме реального времени практически в том же объеме, которым обладает оперативный персонал на блочных пунктах управления, является актуальной задачей, направленной на повышение безопасности. Не менее важными являются задачи формирования специализированных технологических архивов значений дискретных и аналоговых параметров АСУ ТП, а также задачи разработки инструментов анализа любых нештатных ситуаций, имевших место на каждом энергоблоке Ростовской АЭС с начала эксплуатации. Однако гораздо важнее является обеспечение безопасности принятых технических решений.

⁶ Программа-обозреватель «Звездочет» (StarGazer) на ПЭВМ технологических параметров энергоблока № 3 в режиме реального времени. Автоматизированное рабочее место пользователя. – Руководство пользователя. – Волгоград, 2014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Попов В.М., Злобин А.Ю., Поваров П.В. Система представления технологических параметров как средство подготовки исходных данных для работы полномасштабного тренажёра. Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XIX Международной научно-практической конференции, 06 – 07 июня 2023 г. ВИТИ НИЯУ МИФИ. Волгодонск, 2023. С. 134–137. Режим доступа: <http://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii> (дата обращения: 03.06.2024).

Popov V.M., Zlobin A.Yu., Povarov P.V. System of technological parameters representation as a means of initial data preparation for full-scale simulator operation. Safety of nuclear power engineering: Abstracts of XIX International scientific and practical conference, June 06 – 07, 2023. VETI NRNU MEPHI. Volgodosnk, 2023. P. 134–137. Available at: <http://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii> (accessed: 03.06.2024).

2. Сальников А.А., Жуков А.Г., Адаменков А.К. «Режимная диагностика» на основе преобразования данных системы представления технологических параметров. Восьмая международная научно-техническая конференция «Безопасность, экономика и эффективность атомной энергетики»: тезисы докладов. 23-25 мая 2012 г. Москва: Концерн «Росэнергоатом», 2012. С. 128–130. Режим доступа: <http://www.reamntk.ru/mediafiles/u/files/Archive/SbornikTezisovMNTK2012.pdf?ysclid=m06o5p04iw359915693> (дата обращения: 03.06.2024).

Salnikov A.A., Zhukov A.G., Adamenkov A.K. «Mode diagnostics» on the basis of data transformation of the system of representation of technological parameters. Eighth international scientific and technical conference «Safety, economics and efficiency of nuclear power engineering»: abstracts, May 23–25, 2012. Moscow: Concern «Rosenergoatom», 2012. С. 128–130. Available at: <http://www.reamntk.ru/mediafiles/u/files/Archive/SbornikTezisovMNTK2012.pdf?ysclid=m06o5p04iw359915693> (accessed: 03.06.2024).

3. Адаменков А.К., Сальников А.А., Веселова И.Н., Рясный С.И. Управление риском технологических нарушений АЭС. *Атомная энергия*. 2017;123(3):123–128. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/583/562> (дата обращения: 03.06.2024).

Adamenkov A.K., Salnikov A.A., Veselova I.N., Ryasny S.I. Risk management of NPP technological failures. *Atomic energy*. 2017;123(3):123–128. Available at: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/583/562> (accessed: 03.06.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Воробьев Е.В. – разработка программных модулей СПТП;

Новоселов Г.Д. – разработка программных модулей СПТП;

Поваров П.В. – постановка задачи, редактирование текста;

Цыхлер Л.В. – постановка задачи, редактирование текста;

Злобин А.Ю. – подготовка исходных данных.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Воробьев Егор Вячеславович, инженер, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт филиал Национального исследовательского ядерного университет «МИФИ»,

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Vorobiev E.V. – software modules development;

Novoselov G.D. – software modules development;

Povarov P.V. – setting the problem, editing the text;

Tsykhler L.V. – setting the problem, editing the text;

Zlobin A.Y. – the initial data preparation.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

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

г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: xpanr@ya.ru

Новоселов Григорий Дмитриевич, лаборант-исследователь, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: grisha-novoselov@mail.ru

Поваров Прохор Владимирович, кандидат технических наук, доцент, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6478-9907>

e-mail: povarovp@yandex.ru

Цыхлер Лев Вадимович, лаборант-исследователь, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0006-2977-1572>

e-mail: lev.tsyhler@yandex.ru

Злобин Александр Юрьевич, директор филиала АО «КОНСИСТ-ОС» «Волгодонский», г. Волгодонск-28, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: zlobin-au@vdnpp.rosenergoatom.ru

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

e-mail: xpanr@ya.ru

Grigory D. Novoselov, Laboratory Researcher, SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: grisha-novoselov@mail.ru

Prokhor V. Povarov, Can. Sci (Engin), Associate Professor, SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6478-9907>

e-mail: povarovp@yandex.ru

Lev V. Tsykhler, Laboratory Researcher, SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0006-2977-1572>

e-mail: lev.tsyhler@yandex.ru

Alexander Y. Zlobin, Head of the Volgodonsk branch of KONSIST-OS JSC, Volgodonsk-28, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: zlobin-au@vdnpp.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 07.06.2024

После доработки 05.09.2024

Принята к публикации 10.09.2024

Received 07.06.2024

Revision 05.09.2024

Accepted 10.09.2024

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.039:621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-03>

EDN EEWNWU

Оригинальная статья / Original paper



Участие архитектора-инженера в жизненном цикле атомной станции:
инструментарий, возможности, перспективы

О.В. Колтун , С.О. Иванов  , Д.В. Якубов 

АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация

 SOIvanov@vniiaes.ru

Аннотация. Сложившаяся практика принятия решения о сооружении новой атомной станции происходит после утверждения технико-экономических требований к ней с учетом необходимости их обеспечения в процессе сооружения. Не секрет, что практически для всех проектов атомных станций наиболее важные показатели технико-экономических требований, такие как капитальные затраты и срок строительства, в настоящее время не соблюдаются. Как правило, это свидетельствует о недостаточно хорошей проработке проекта, несовершенстве сметной документации, управленческих проблемах в ходе строительства. Отличительной особенностью сооружения атомных станций в Российской Федерации является то, что эксплуатирующая организация является одновременно и заказчиком проекта, принимая участие в обеспечении всех этапов жизненного цикла атомной станции и неся ответственность за достижение технико-экономических требований проекта. В этой связи актуальной задачей является осуществление экспертной поддержки заказчика проекта со стороны экспертной организации, способной осуществлять независимую оценку качества проекта и хода его реализации. На основе положительного опыта обозначена необходимость сопровождения деятельности технического заказчика экспертной организацией – архитектором-инженером. Учитывая мировую практику проектирования, строительства и эксплуатации инженерно-сложных и капиталоемких проектов, со стороны архитектора-инженера необходимо аргументированно подтвердить ряд оптимизационных мероприятий на основе применения современных методов (управление требованиями, применение технико-экономических и математических моделей, разработка и применения цифровых моделей и цифровых двойников атомных станций). Обоснована необходимость применения экспертизы решений при управлении и контроле качества проектирования и сооружения атомных станций с помощью технико-экономической модели и цифровых двойников для новых проектов атомных станций на всех этапах их жизненного цикла.

Ключевые слова: сооружение атомных станций, конкурентные преимущества, управление проектом, архитектор-инженер, технико-экономическая модель, цифровой двойник, жизненный цикл, риск, безопасность.

Для цитирования: Колтун О.В., Иванов С.О., Якубов Д.В. Участие архитектора-инженера в жизненном цикле атомной станции: инструментарий, возможности, перспективы. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):35–41. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-03>

For citation: Koltun O.V., Ivanov S.O., Yakubov D.V. Architect-engineer participation in the life cycle of nuclear power plant: tools, opportunities and prospects. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):35–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-03>

Architect-engineer participation in the life cycle of nuclear power plant: tools, opportunities and prospects

Oleg V. Koltun , Sergei O. Ivanov  , Denis V. Yakubov 

JSC «VNIAES», Moscow, Russian Federation

 *SOIvanov@vniiaes.ru*

Abstract. The established practice of making a decision on the construction of a new nuclear power plant occurs after the approval of the technical and economic requirements for it, taking into account the need to ensure them during the construction process. It is no secret that the most important indicators of technical and economic requirements, such as capital costs and construction time, are currently not kept for almost all nuclear power plant projects. As a rule, this indicates an insufficiently good elaboration of the project, imperfection of the estimate documentation, and management problems during construction. A distinctive feature of the construction of nuclear power plants in the Russian Federation is that the operating organisation is at the same time the customer of the project, taking part in ensuring all stages of the life cycle of the nuclear power plant, and bearing responsibility for achieving the technical and economic requirements of the project. In this regard, an urgent task is to provide expert support to the project customer from an expert organisation capable of independently assessing the quality of the project and the progress of its implementation. The necessity of support of the technical customer's activity by an expert organisation - architect-engineer is outlined on the basis of positive experience. Taking into account the world practice of designing, building and operating engineering-complex and capital-intensive projects, it is necessary for the architect-engineer to substantiate a number of optimisation measures based on the use of modern methods (requirements management, application of technical, economic and mathematical models, development and application of digital models and digital twins of nuclear power plants). The necessity of using decision expertise in managing and quality control of nuclear power plant design and construction is substantiated using a technical and economic model and digital twins for new nuclear power plant projects at all stages of their life cycle.

Keywords: nuclear power plant construction, competitive advantages, project management, architect-engineer, technical and economic model, digital twin, life cycle, risk, safety.

Введение

В соответствии с поручением Президента РФ для атомной отрасли была поставлена задача по доведению уровня выработки электроэнергии на атомных станциях (АС) к 2045 г. до 25% от общей выработки электроэнергии по стране. Это амбициозная задача для отрасли, учитывая, что к 2045 г. заканчиваются продленные сроки эксплуатации АС, сооруженных в 70–80-х годах прошлого века. Установленный показатель планируется достигнуть в основном за счет сооружения новых АС, так как повышение выработки электроэнергии на действующих АС подошло к своему пределу. Учитывая выводимые из эксплуатации энергоблоки, к 2045 г. нужно ввести в эксплуатацию порядка 48 энергоблоков АС (большой, средней и

малой мощности) суммарной установленной мощностью порядка 32,4 ГВт¹.

Сложившаяся практика принятия решения о сооружении новой АС происходит после утверждения технико-экономических требований (ТЭТ) к ней с учетом необходимости их обеспечения в процессе сооружения. Не секрет, что практически для всех проектов АС наиболее важные показатели ТЭТ, такие как капитальные затраты и срок строительства, в настоящее время не соблюдаются. Как правило, это свидетельствует о недостаточно хорошей проработке проекта, несовершенстве сметной документации, управленческих проблемах в ходе строительства.

¹ Строящиеся АЭС. – Госкорпорация Росатом : официальный сайт. – Режим доступа: <https://rosatom.ru/production/design/stoyashchiesya-aes/> (дата обращения: 25.05.2024).

Отличительной особенностью сооружения АС в РФ является то, что эксплуатирующая организация (Концерн Росэнергоатом) является одновременно и заказчиком проекта, принимая участие в обеспечении всех этапов жизненного цикла АС, и неся ответственность за достижение ТЭТ проекта.

В этой связи, актуальной задачей является осуществление экспертной поддержки заказчика проекта со стороны экспертной организации, способной осуществлять независимую оценку качества проекта и хода его реализации.

Архитектор-инженер

В мировой практике такое сопровождение наиболее технически сложных проектов, к числу которых относятся и АС, связанное с контролем качества проектирования и сооружения, как правило, выполняют технические инжиниринговые компании (Инженер инвестора, Инженер владельца, Технический агент и др.) [1]. В РФ в атомной отрасли такая организация получила название Архитектор-инженер (АИ).

Целью деятельности АИ является осуществление непрерывного контроля и экспертиза хода реализации проекта на всех этапах от подготовки концепции до анализа качества реализации и полноты обоснований. Важным моментом работы АИ является выявление коллизий, допущенных в ходе реализации проекта и оперативное внесение изменений в рабочую документацию с целью недопущения тиражирования ошибок в последующих проектах.

Другим направлением изучения АИ должно стать отслеживание хода эксплуатации объекта с целью выявления неудачных технических решений и их учет в последующих модернизациях проекта. На всех этапах работы АИ должен оказывать оптимизационные воздействия на процессы, ставить своей целью поиск оптимальных решений, в том числе на ранних стадиях разработки проекта, прогнозирование эффективности проекта, его конкурентоспособности.

С учетом принятых в мире передовых практик проектного управления Госкорпорацией «Росатом» в 2010 г. в рамках реализации проекта ВВЭР функцию АИ было по-

ручено реализовывать АО «ВНИИАЭС», для чего было создано специализированное подразделение. В рамках проекта ВВЭР-ТОИ АИ выполнил ряд работ, в том числе:

- проведены экспертизы технических заданий (ТЗ), достижимости ТЭТ и Концепт проекта ВВЭР-ТОИ, сформулировано более 500 предложений по улучшению проекта;

- проведен подробный анализ всех конкурирующих с ВВЭР-ТОИ зарубежных проектов АЭС. С учетом этого анализа была проведена работа по оценке конкурентоспособности проекта ВВЭР-ТОИ и сформулированы области, которые необходимо совершенствовать;

- создана экономическая модель, позволяющая оценивать капитальные затраты и фактическую себестоимость электроэнергии ВВЭР-ТОИ, а также влияние различных технических решений на эти параметры, что позволило оперативно определять их экономическую эффективность;

- создана современная компьютерная система управления требованиями, позволяющая контролировать выполнение требований ТЗ в процессе проектирования АЭС с ВВЭР-ТОИ. С использованием этой системы выполнен анализ реализации всех требований ТЗ на ВВЭР-ТОИ;

- реализована компьютерная связь АИ с проектными организациями, позволившая в режиме on-line анализировать ход проектирования и создать математические модели всех подсистем АС с ВВЭР-ТОИ;

- созданы математические модели АС, которые использовались для оценки соответствия проекта ВВЭР-ТОИ требованиям, заложенным в ТЗ в различных режимах работы АЭС. В ходе такой проверки были выявлены недостатки проекта ВВЭР-ТОИ и сформулированы предложения по их устранению.

Выполнение данных работ способствовало повышению качества проекта ВВЭР-ТОИ в целом. Внедрение результатов работ АИ, базирующихся на результатах технико-экономических исследований, анализе мирового опыта проектирования, накопленном опыте эксплуатации АС частично оказало положительное влияние на технико-

экономические характеристики и конкурентоспособность проекта. Вместе с тем, в связи с несовершенством управленческих решений и особенностями договорных отношений, отсутствием нормативно-правовых актов, в части описания роли АИ в проекте, предложения АИ по улучшению проекта носили лишь рекомендательный характер.

При осуществлении функций АИ в проекте ВВЭР-ТОИ, также сформулирован запрос о необходимости пересмотра существующих подходов к разработке и утверждению ТЭТ, в том числе в части проведения предварительного технико-экономического анализа достижимости требований, предъявляемых к будущему проекту.

Одновременно учитывая мировую практику проектирования, строительства и эксплуатации инженерно-сложных и капиталоемких проектов, был сформирован запрос на необходимость аргументированного подтверждения со стороны АИ ряда оптимизационных мероприятий на основе применения современных методов (управление требованиями, применение технико-экономических и математических моделей, разработка и применения цифровых моделей и цифровых двойников АС). Примеры применения некоторых из них представлены ниже.

Технико-экономическая модель (ТЭМ)

Основываясь на выполняемых АО «ВНИИАЭС» задачах по экспертизе проектов ВВЭР-ТОИ, БН-1200, ВВЭР-С-600, РИТМ-200, были сформулированы следующие требования к концепции и методике ТЭМ:

- проведение многовариантных оценок проектов АС и ядерных энергетических систем (ЯЭС) в открытом и замкнутом топливных циклах по интегральным показателям экономической эффективности, а также оценка частных технико-экономических показателей проектных решений по стадиям жизненного цикла;

- прогнозирование экономической эффективности, конкурентоспособности проектов АС по сравнению с другими типами генераций на предпроектных стадиях (инве-

стиционное предложение, обоснование инвестиций, технико-экономическое обоснование), с учетом особенностей площадок;

- возможность многокритериального анализа инвестиционной привлекательности конкурирующих проектов АС и ЯЭС;

- оценка устойчивости, чувствительности полученных результатов, с учетом полноты и достоверности исходных данных.

Модель позволяет решать следующие задачи:

Интегральные:

- прогнозирование показателей экономической эффективности (NPV, IRR и др.) при условии бюджетного и коммерческого финансирования, анализ чувствительности результатов, с учетом страновых, региональных особенностей конкретных площадок, условий, технологии строительства и эксплуатации;

- прогнозирование инвестиционных и финансовых показателей по стадиям жизненного цикла, в т.ч. полной удельной приведенной стоимости производства единицы электрической энергии (LCOE), себестоимость электроэнергии для АС и ЯЭС;

- разработка рекомендаций по повышению конкурентоспособности АС и ЯЭС в сопоставлении с другими видами генераций.

Частные (локальные):

- расчет капитальных затрат для различных вариантов проектных решений АС и ЯЭС для различных сценарных условий и на базе исходных данных различной полноты и детализации;

- прогнозирование эксплуатационных затрат, включая стоимость топливной составляющей, для открытого и замкнутого топливного циклов;

- прогнозирование реалистичных сроков сооружения АС с учетом технологических особенностей строительно-монтажных работ и для различных сценариев организационно-управленческого характера;

- оценка затрат на вывод объектов из эксплуатации для различных концепций и условий вывода.

Цифровой двойник

Цифровой двойник (ЦД) АС представляет собой зеркальное отражение объекта АС, спроецированное из физического пространства в киберпространство, разработанный с применением мультифизических кодов. Анализ исследований, выполняемых в области использования концепции ЦД АС 2, подтверждает актуальность их применения как при проектировании, так и в интеллектуальном управлении сложными объектами и системами [2].

Начиная со стадии разработки концепции АС для проведения более полных технико-экономических исследований (ТЭИ) целесообразно применение технологии ЦД, которая позволяет уменьшить как сроки разработки проекта АС, так и обеспечить конкурентоспособность АС. Конкурентоспособность АС включает в себя не только характеристики безопасности и надежности, но и технико-экономические показатели на уровне показателей электростанций на органическом топливе при учете всех затрат на всех этапах жизненного цикла АС интегрированного в замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ). Учитывая, что показатели безопасности и показатели экономической эффективности лишь отчасти пересекаются, а чаще выставляют разнонаправленные (противоречивые) требования, применение ЦД АС будет способствовать максимизации выгодных характеристик и минимизации затрат на всех этапах жизненного цикла АС разных мощностей и проектов. В то же время на предпроектной стадии и в ходе проектирования полноценная разработка ЦД невозможна, поскольку еще не сложилась конфигурация станции, не детализированы проектные решения. На этом этапе целесообразно создавать методическое и программное обеспечение ЦД, которое впослед-

ствии будет наполняться всё более содержательной информацией. После окончания сооружения АС, разработанный и содержащий полную информацию о проектных решениях ЦД эффективно применять на этапе эксплуатации АС.

После окончания сооружения АС, разработанный и содержащий полную информацию о проектных решениях ЦД эффективно применять на этапе эксплуатации АС. Его применение дает в том числе возможность учитывать и накапливать информацию о всех изменениях, произошедших в оборудовании, системах и проекте АС на данном этапе и принять оптимальные решения при переходе и реализации следующего этапа жизненного цикла АС – вывод из эксплуатации. Также к существенным плюсам разработки ЦД АС следует отнести возможность углубленного обучения персонала АС, выделение в проекте АС не изменяемой части, сохранения и передачи критически важных знаний.

Как показывает практика сооружения АС большой мощности (по проектам технологии ВВЭР), с определенными допущениями оценить системную экономическую эффективность (выраженную в стоимости вырабатываемой АС электроэнергии) всего проекта возможно без применения ЦД, используя ретроспективный подход и накопленный опыт. Однако применение такого подхода не оправдано в случае сооружения головных блоков АС большой мощности, АС средней мощности (АССМ) и особенно АС малой мощности (АСММ), т.к. малая атомная энергетика находясь на раннем этапе своего развития, не обладает достаточно проработанной нормативной регуляцией и не имеет системного подхода к оценке организационно-экономических рисков и комплексных способов управления ими [3]. Таким образом, разработка ЦД становится весьма актуальной задачей при проектировании и сооружении АСММ [4] принимая во внимание, что системная экономическая эффективность проекта АСММ, так же, как и для АС большой мощности складывается с учетом всех сопряженных сфер деятельности и этапов жизненного цикла (аналогично тому как оценивается себестоимость производства

² Дружаев А.А., Мосунова Н.А. Состояние разработки программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» // Сборник тезисов докладов межотраслевого научно-технического семинара «Моделирование динамики ЯЭУ» (разработка программных средств, верификация, оценка точности расчета), г. Сосновый бор, 5-7 июня 2018 год. С. 14–18.

электроэнергии, включая топливную, эксплуатационную, капитальную составляющие и вывод из эксплуатации) [5]. Дополнительным доводом для разработки и применения ЦД АС является необходимостью учета региональных энергосистем и географического нахождения АС, существенно влияющих на механизм формирования цен, по которым потребителями будет закупаться вырабатываемая АС электроэнергия и мощность.

Использование Multi-D моделирования

Положительным эффектом использования Multi-D в качестве одного из инструментов в работе АИ является обеспечение более наглядного предоставления экспертируемых проектных данных и возможность проведения имитационного моделирования различных строительных и технологических процессов.

Работа по проекту ВВЭР-ТОИ показала эффективность применения 3D-моделей. При этом были достигнуты такие значимые результаты, как сокращение времени проектных работ, повышения качества проектной документации, сокращение времени на ознакомление с проектной документацией.

Заключение

В ходе работы был проанализирован полученный при реализации проекта ВВЭР-

ТОИ опыт применения функционала АИ, который выявил необходимость продолжения работ по интеграции АИ в процесс разработки проектов АС и усилению его роли. Наиболее актуальными вопросами процесса интеграции на текущий момент являются:

- закрепление функционала АИ на отраслевом уровне путем внесения в организационно-распорядительные документы Госкорпорации «Росатом» необходимости участия АИ во всех проектах АС, реализуемых ГК;
- наделение АИ полномочиями по согласованию разрабатываемых проектов на правах внутренней экспертизы Госкорпорации «Росатом»;
- создание механизмов, позволяющих вносить изменения в разрабатываемые проекты на основе рекомендаций АИ (управляющая обратная связь);
- совершенствование инструментария АИ (техничко-экономической модели, цифровые двойники и применение решений на базе искусственного интеллекта);
- накопление и аналитическая обработка данных, получаемых в ходе эксплуатации АС, для последующего использования при рассмотрении проектных решений для новых АС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сальникова А.А., Гудеменко Д.В. Подходы к оказанию услуг на этапе сооружения атомных станций за рубежом. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;3(44):22–29. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-02>
Salnikova A.A., Gudemenko D.V. Approaches to service provision during the construction phase of nuclear power plants abroad. *Global nuclear safety*. 2022;(3):22–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2022-03-02>
2. Колтун О.В., Павлов А.С., Жданова М.В. Технико-экономические аспекты цифрового моделирования строительных объектов энергетики. *Строительство и архитектура*. 2023;11(2):4. EDN KQVNEW. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2023-11-2-4-4>
Koltun O. V., Pavlov A. S., Zhdanova M. V. Technical and economic aspects of digital modeling of construction energy facilities. *Construction and architecture*. 2023;11(2):4. (In Russ.). EDN KQVNEW. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2023-11-2-4-4>
3. Щекин Д.В., Бых Я.О., Веденеев А.Э., Юрина И.В. Основные риски проектов малой атомной энергетики на примере пилотного проекта АСММ на базе реакторной установки ритм-200Н. VIII Молодежная конференция по управлению проектами: сборник тезисов докладов. Нижний Новгород. 17 ноября 2023 года. Нижний Новгород: ООО «Литера», 2023. С. 21–22. EDN LCDVOR. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65306220> (дата обращения: 26.05.2024).
Shchekin D.V., Bykh Ya.O., Vedeneev A.E., Yurina I.V. The main risks of small-scale nuclear energy projects using the example of a pilot project of a nuclear power plant based on the Rhythm-200N reactor

plant. VIII Youth conference on project management: collection of abstracts of reports. Nizhny Novgorod. November 17, 2023. Nizhny Novgorod: LLC «Litera», 2023. P. 21–22. (In Russ.). EDN LCDVOR. Available at <https://elibrary.ru/item.asp?id=65306220> (accessed: 26.05.2024).

4. Соловьев С.Л., Зарюгин Д.Г., Калякин С.Г. Перспективные направления развития атомных станций малой мощности в России. *Вестник Российской академии наук*. 2023;93(2):103–111. EDN FDMCZR <https://doi.org/10.31857/S086958732302010X>

Kalyakin S.G., Soloviev S.L., Zaryugin D.G. Prospects for the development of small nuclear power plants in Russia. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2023;93(2):103–111. (In Russ.). EDN FDMCZR <https://doi.org/10.31857/S086958732302010X>

5. Рыжикова Т.Н., Щепетина Т.Д., Чумак Д.Ю. Анализ экономических аспектов развития атомных станций малой и средней мощности в России. *Экономический анализ: теория и практика*. 2018;17(8):479:1400–1413. EDN UWOROY. <https://doi.org/10.24891/ea.17.8.1400>

Ryzhikova T.N., Shchepetina T.D., Chumak D.Yu. Analyzing the economic aspects of small and medium capacity nuclear plant development in Russia. *Economic analysis: theory and practice*. 2018;17(8):1400–1413. (In Russ.). <https://doi.org/10.24891/ea.17.8.1400>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Колтун О.В. – постановка проблемы, значительный вклад в концепцию исследования;

Иванов С.О. – разработка концепции исследования, критический анализ литературы, подготовка и оформление текста статьи;

Якубов Д.В. – описание результатов и формирование выводов исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Олег Владимирович Колтун, кандидат технических наук, руководитель департамента, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0005-0442-5828>

e-mail: OVKoltun@vniiaes.ru

Сергей Олегович Иванов, руководитель проекта, АО «ВНИИАЭС»; кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0009-0349-0440>

e-mail: SOIvanov@vniiaes.ru

Денис Вячеславович Якубов, руководитель проектного офиса, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0007-2813-4077>

e-mail: DVYakubov@vniiaes.ru

Поступила в редакцию 21.06.2024

После доработки 05.09.2024

Принята к публикации 10.09.2024

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Koltun O.V. – problem statement, significant contribution to the research concept;

Ivanov S.O. – development of the research concept, critical analysis of the literature, preparation and formatting of the text of the article;

Yakubov D.V. – description of the results and formation of conclusions of the research.

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Oleg V. Koltun, Can. Sci. (Engin.), Head of Department, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0005-0442-5828>

e-mail: OVKoltun@vniiaes.ru

Sergei O. Ivanov, Project Manager, JSC «VNIIAES», Can. Sci. (Engin.), Assistant Professor., MPEI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0009-0349-0440>

e-mail: SOIvanov@vniiaes.ru

Denis V. Yakubov, Head of the Project Office, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0007-2813-4077>

e-mail: DVYakubov@vniiaes.ru

Received 21.06.2024

Revision 05.09.2024

Accepted 10.09.2024

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

УДК 551.5:621.311.25:69

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-04>

EDN HZMSUZ

Оригинальная статья / Original paper



Метеорологические особенности регионов строительства АЭС в Нигерии

К.Б. Орумо¹ , А.И. Ксенофонтов² , А.П. Елохин²  

¹Отдел развития атомных электростанций, Комиссия по атомной энергии Нигерии, Абуджа, Нигерия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

г. Москва, Российская Федерация

 elokhin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос применения методики оценки метеорологических характеристик в регионах, рекомендуемых к строительству АЭС в Нигерии. В качестве таковых рассматриваются регионы Герегу и Иту, с существенно различающимися метеорологическими характеристиками, поскольку они расположены в различных частях страны (первая в засушливом регионе, в центре страны, вторая – на побережье гвинейского залива в дельте реки Нигер). В рамках методики приводятся математический аппарат, позволяющий вычислять основные характеристики модели приземного слоя атмосферы. Использование этого аппарата позволило оценить общий характер метеорологических характеристик регионов (продольную скорость ветра, коэффициент турбулентной диффузии, параметр, характеризующий поперечное рассеивание примеси) и их усредненные значения, используемые в дальнейшем как некие параметры, позволяющие определить характеристики радиоактивного загрязнения окружающей среды, к которым можно отнести воздушный бассейн и подстилающую поверхность. Использование геофизической модели приземного слоя атмосферы и полученных метеопараметров позволило ответить на ряд вопросов, касающихся особенностей переноса радиоактивной примеси в атмосфере, характерных для того или другого регионов Нигерии, в которых правительство страны намерено построить атомные электростанции. С этой целью в рамках гипотетических радиационных аварий были получены осевые и поперечные распределения радиоактивной примеси в зависимости от состояния устойчивости атмосферы, которые выявили особенности распространения р/а примеси в указанных регионах. Представленные результаты расчетов целесообразно принимать во внимание при оценке размеров санитарно-защитной зоны, располагаемой вокруг АЭС в том и другом регионах, и необходимого и достаточного количества постов радиационного контроля окружающей среды при их размещении в пределах этих зон.

Ключевые слова: метеорологические характеристики регионов, геофизическая модель приземного слоя атмосферы, перенос радиоактивной примеси в атмосфере, санитарно-защитная зона АЭС, состояние устойчивости атмосферы.

Для цитирования: Орумо Б.К., Ксенофонтов А.И., Елохин А.П. Метеорологические особенности регионов строительства АЭС в Нигерии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):42–55. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-04>

For citation: Orumo B.K., Ksenafontov A.I., Elokhin A.P. Meteorological features of NPP construction regions in Nigeria. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):42–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-04>

Meteorological features of NPP construction regions in Nigeria

Kenoll B. Orumo¹ , Alexander I. Ksenafontov² , Alexander P. Elokhin²  

¹Department of Development of Nuclear Power Plants, Nigeria Atomic Energy Commission, Abuja, Nigeria

²National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

 elokhin@yandex.ru

Abstract. The paper considers the application of meteorological characterisation methodology to the regions recommended for NPP construction in Nigeria. Regions Geregu and Itu are considered as such, with significantly different meteorological characteristics, as they are located in different parts of the country (the former in the arid region, in the centre of the country, the latter - on the coast of the Gulf of Guinea in the Niger Delta). The methodology provides the mathematical apparatus for calculating the main characteristics of the surface layer of the atmosphere model. The use of this apparatus made it possible to estimate the general character of meteorological characteristics of the regions (longitudinal wind speed, turbulent diffusion coefficient, parameter characterising the transverse dispersion of impurity) and their averaged values used further as some parameters allowing to determine the characteristics of environmental radioactive contamination, which can include the air basin and the underlying surface. The use of a geophysical model of the surface layer of the atmosphere and the meteorological parameters obtained made it possible to answer a number of questions concerning the peculiarities of atmospheric transport of radioactive impurity characteristic of the regions of Nigeria in which the Government of Nigeria intends to build nuclear power plants. Therefore, the axial and transverse distributions of radioactive impurity as a function of atmospheric stability were obtained under hypothetical radiation accidents, which revealed the peculiarities of p/a impurity distribution in these regions. The presented results of calculations should be taken into account when estimating the size of the sanitary protection zone around NPPs in one and another region and the necessary and sufficient number of environmental radiation monitoring stations when they are located within these zones.

Keywords: region meteorological characteristics, geophysical model of the atmosphere surface layer, transport of radioactive impurity in the atmosphere, NPP sanitary protection zone, atmospheric stability state.

Введение

Задаваясь вопросом строительства АЭС в каком-либо регионе любой страны в соответствии с нормативными документами необходимо учитывать категорию объекта, его потенциальную радиационную и химическую опасность для населения и окружающей среды^{1, 2}. Согласно п.3.2.2. «Основных санитарных правил» указанного документа, при выборе места размещения радиационных объектов I-III категории должны быть оценены метеорологические, гидрологические, геологические и сейсмиче-

ские факторы, влияющие на безопасность радиационных объектов при их нормальной эксплуатации и при возможных авариях. Метеорологические исследования играют важную роль в определении размеров санитарно-защитной зоны и влияют на характер радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности в условиях радиационных аварий. Основываясь на этих требованиях рассмотрим метеорологические условия регионов «Герегу» и «Иту» в Нигерии, в которых Федеральное правительство страны предполагает строительство АЭС [1].

Основная часть

Общая характеристика метеорологических условий в указанных регионах Нигерии приводится в таблицах 1 и 2.

В целом в климате Нигерии выделяются два ярко выраженных сезона (дождливый и сухой), которые формируют основные типы воздушных масс. Один из них формируется морским экваториальным воздушным потоком, который летом приносит с побережья

¹ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ 99/2010. – Режим доступа: <http://sanedlab.ru/wp-content/uploads/2014/09/osprb-99-2010-1.pdf> (дата обращения: 26.09.2024).

² Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. – Режим доступа: https://stroychik.ru/wp-content/uploads/2020/04/osporb_cp2-6-1-2612-10.pdf?ysclid=1zshj4msce874398021 (дата обращения: 26.09.2024).

влажные ветры, а затем над пустыней возникает зона пониженного давления, а другой – континентальный тропический, который переносится из Сахары пыльным воздухом (сухой ветер Хармана). Сезон дождей в стране длится с марта по сентябрь, и только на юге он ненадолго прерывается в августе,

а сухой сезон приходится на остальные месяцы года (на севере он длится дольше, чем в других регионах). Если приведенная информация и даёт какое-то общее представление о метеорологических условиях в указанных регионах, тем не менее, эти данные

Таблица 1. Ежедневная выписка метеонаблюдений в Герегу штата Когги

Table 1. Daily weather statement in Gerega of Kogi State

Месяц	Темп. макс	Темп. мин.	Темп. средн.	Точка росы	Отн. осадков	Облачность	Отн. влажность	Соля-ция	Ветр. режим	Скорость ветра
Январь	35,5	16,6	26,0	20,8	0	6,8	69	4,2	140	3,0
Февраль	36,0	26,2	31,1	24,9	4,7	6,7	66,5	4,7	180	4,0
Март	35,8	25,6	30,7	25,2	4,8	6,8	69	8,2	210	4,0
Апрель	33,0	25,0	29,0	24,5	2,6	6,5	72	6,7	220	4,5
Май	30,1	24,1	27,1	23,7	6,6	7	74	4,6	180	4,0
Июнь	31,0	24,0	27,5	23,8	14,3	7	76	4,5	190	4,5
Июль	30,6	22,4	26,5	23,3	13,9	7	79	5,8	180	4,0
Август	31,2	23,5	27,4	21,8	11,4	7	83	4,4	210	4,0
Сентябрь	30,2	22,0	26,1	22,2	16,4	7	80	0	210	3,5
Октябрь	32,5	22,6	27,6	21,4	11,4	4,5	72	0	230	4,0
Ноябрь	34,5	22,0	28,3	22,3	4,5	7	65	0	230	4,0
Декабрь	33,8	18,0	25,9	16,8	0	6,2	57	0	210	3,0
Средн.	32,9	22,7	27,8	22,6	7,6	6,6	71,9	3,6	199,2	3,9

Таблица 2. Ежедневная выписка метеорологических наблюдений в Иту штата Аква Ибом

Table 2. Daily extract of meteorological observations in Itu of Akwa Ibom State

Месяц	Темп. макс	Темп. мин.	Темп. средн.	Точка росы	Отн. осадков	Обла-чность	Отн. влажность	Соля-ция	Ветр. реж.	Ско-рость ветра	Давле-ние
Январь	33,5	19,5	26,5	17,7	0	6,5	59,0	5,7	120	3,5	13,8
Февраль	35,0	23,2	29,1	17,9	0,7	7	44,5	3,7	80	4,0	13,9
Март	32,5	22,6	27,6	18,6	6,1	7	62	3,2	180	3,0	13,7
Апрель	31,5	21,4	26,5	19,4	3,8	7	66	3,2	210	4,0	12,2
Май	31,2	23,1	27,2	24,0	1,5	7	84	4,2	190	2,8	13,1
Июнь	31,5	22,6	27,1	23,3	4,6	6,3	85	5,5	170	3,0	14,8
Июль	29,5	22,6	26,1	21,1	4,3	7	84	4,8	230	4,0	17,1
Август	27,5	23,0	25,3	24,8	5,2	7	93	1,5	240	3,5	16,4
Сентябрь	29,4	21,8	25,6	21,7	2,0	4,5	78	3,1	200	3,0	14,4
Октябрь	29,7	22,6	26,2	24,2	2,4	7	85	3,6	180	2,5	13,5
Ноябрь	29,5	23,0	26,3	24,3	2,1	7	80	3,8	240	0,5	13,1
Декабрь	33,5	22,0	25,9	21,0	0	6,5	60	5	100	0,6	13,5
Средн.	31,2	22,3	26,8	21,5	2,73	6,7	73,4	3,9	178,5	2,9	14,1

не могут быть применены для построения метеорологической модели, которую можно было бы использовать для оценок радиоактивного загрязнения окружающей среды (воздушного бассейна и подстилающей поверхности) в случае радиационных аварий на АЭС, в том или другом регионах. Поэтому авторы считают целесообразным воспользоваться результатами ряда работ ³

[2,3], в которых были описаны модели приземного и пограничного слоёв атмосферы,

³ Елохин А.П., Жилина М.В., Рау Д.Ф., Иванов Е.А. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население. РБ – 053 – 09. Режим доступа: <https://docs.secnrs.ru/documents/rbs/%D0%A0%D0%91-053-10/RB053-10.pdf> (дата обращения: 26.05.2024).

используемых в работах [4-6] для описания метеорологических характеристик при строительстве в регионах любых объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) [4] и при строительстве АЭС в Иордании [5] и Иране [6]. Наиболее простое решение задачи определения метеорологических условий регионов, выделенных под строительство АЭС в Нигерии можно найти, используя модель приземного слоя атмосферы, достаточно подробно рассмотренную в работах [2], [3]. Приземный слой атмосферы играет важнейшую роль в формировании метеорологических процессов во всем пограничном слое атмосферы и характеризуется наиболее резкими изменениями метеорологических элементов (скорости ветра, температуры, влажности) с высотой. В этом слое выделяют следующие особенности [2]:

1. Потоки количества движения и тепла в приземном слое считают постоянными.

2. Ускорение силы Кориолиса не оказывает влияния на происходящие в приземном слое процессы и не может входить в решение соответствующих уравнений. Кроме того, рассматривают случай, когда выполняются условия стационарности и горизонтальной однородности подстилающей поверхности. Система уравнений, описывающая состояние приземного слоя, состоит из уравнений*:

- динамики (1)

$$k_n \frac{du_n}{dz_n} = \eta_n = 1; \quad (1)$$

- теплопроводности (2):

$$\alpha_T k_n \frac{dq_n}{dz_n} = \eta_n = 1; \quad (2)$$

- баланса кинетической энергии флуктуации с учетом ее постоянства в области малых z (3):

$$1/k_n - 1 - b_n^2/k_n = 0; \quad (3)$$

- уравнения, связывающего среднюю кинетическую энергию турбулентных пульсаций b_n с коэффициентом турбулентной диффузии k_n и масштабом турбулентных пульсаций l_n (4):

$$k_n = l_n \sqrt{b_n}, \quad (4)$$

а также уравнения для масштаба турбулентных пульсаций (5):

$$l_n = 2 \cdot \frac{k_n(1-k_n)}{2-k_n} \cdot \frac{dz_n}{dk_n}, \quad (5)$$

где $z_n = z/L$ – безмерная высота; L – масштаб Монина–Обухова (масштаб приземного слоя); u_n – безразмерная скорость ветра ($u = v \cdot u_n/k$; v^* – динамическая скорость, $k = 0,4$ – постоянная Кармана); $\alpha_T = k_T/k$ – отношение коэффициента турбулентности для тепла и количества движения (рис. 1).

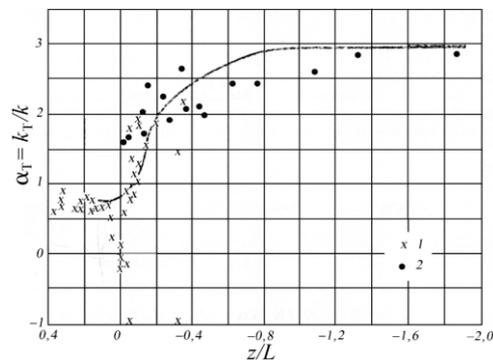


Рисунок 1. Зависимость отношения коэффициентов турбулентности для тепла и количества движения α_m от безразмерной высоты z/L [3]:

1 – Раунд Хилл; 2 – Австралия

Figure 1. Dependence of the turbulence coefficient ratio for heat and quantity of motion α_m on the dimensionless height z/L [3]: 1 – Round Hill; 2 – Australia

Исключая из уравнений (3), (4) величины l_n и b_n , получают уравнение $dk_n/dz_n = 2(1-k_n)^{5/4}/(2-k_n)$, решение которого при условии $\lim_{z_n \rightarrow \infty} (k_n) = 0$ дает (6), (7):

$$z_n = 2/y - 2y^3/3 - 4/3 \quad (6)$$

$$k_n = 1 - y^4, \quad (7)$$

где y – вычисляемые (см. ниже) значения функции y для различных z_n . При этом для u_n, b_n, l_n получают (8)–(13):

$$u_n = 2/y + 2 \arctg(y) + \ln(|1-y|/|1+y|) + C_1; \quad (8)$$

$$b_n = y^2; \quad (9)$$

*Все уравнения приводятся в безразмерных величинах.

$$l_n = (1 - y^4) / y; \quad (10)$$

$$q_n = \int_{z_0}^{z_n} \frac{dz_n}{\alpha_T k_n}; \quad (11)$$

$$k(z) = k \cdot v_* L k_n; \quad u(z) = v_* u_n / k; \quad (12)$$

$$b = v_*^2 c^{-1/2} b_n = 4,6625 v_*^2 b_n.$$

$$L = -\frac{v_*^3}{k \cdot (g/T_0)(P_0/\rho c_p)}, \quad (13)$$

где g – ускорение свободного падения,
 T_0 – температура на уровне земли.

Уравнение (6) относительно y имеет аналитическое решение Феррари и зависит от z_n следующим образом [3] (14):

$$y = \left\{ \begin{array}{l} \frac{-\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B)-4 \cdot \left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2} \right)^2 + 3} \right]}}{2}, z_n \geq -\frac{4}{3} \\ \frac{\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B)-4 \cdot \left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2} \right)^2 + 3} \right]}}{2}, z_n \leq -\frac{4}{3} \end{array} \right\}, \quad (14)$$

$$\text{где } A = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} + \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}, \quad B = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} - \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}.$$

При $z = -4/3$ $A = 2$, $B = -2$, $A + B = 0$ $y = \sqrt[4]{3}$.

Таким образом, зависимости скорости ветра $u(z)$ и коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ в рамках модели приземного слоя атмосферы могут быть успешно найдены, если известны параметры приземного слоя v_* и L .

Методика обработки градиентных наблюдений

В рамках модели приземного слоя атмосферы вычисления указанных параметров проводят следующим образом [2]. Измеряют скорость ветра и температуру на двух уровнях z_1 и z_2 , используя значения высот, меньшая из которых должна составлять не менее 10 м, поскольку при измерении скорости ветра на малых высотах возникает возмущение профиля ветра за счет влияния изменения шероховатости подстилающей поверхности [8]. Далее находят разности скорости ветра $Du = u(z_1) - u(z_2)$ и потока тепла $Dq = \theta(z_1) - \theta(z_2)$. Используя формулу (13) и выражения для скорости ветра и температуры через безразмерные величины: $u = v_* u_n / k$,

$q = -q_* q_n / k$, $\theta_0 = P_0 / c_p v_*$ (θ – потенциальная температура $\theta = -\theta_* \cdot \theta_n / k$; $q_* = P_0 / (\rho \cdot c_p v_*)$, P_0 – поток тепла, ρ – плотность воздуха, c_p – удельная теплоемкость), с одной стороны, получают выражение для динамической скорости v_* , определяемой через отношение разностей измеряемых и вычисляемых значений скорости ветра, на каждой безразмерной высоте z_n по формуле (8) в виде: $k(Du/Du_n) = v_*$, а с другой, ее квадрат: $v_*^2 = k^2 L(g/\theta_0)(Dq/Dq_n)$, пропорциональный отношению разности измеряемых и вычисляемых значений потоков тепла, также измеряемых и вычисляемых на заданных высотах. При этом разность тепловых потоков Dq_n на двух различных высотах при использовании формулы (11) вычисляется по формуле $Dq_n = -[q(z_{n1}) - q(z_{n2})] = -\int_{z_{n1}}^{z_{n2}} \frac{dz_n}{\alpha_T k(z_n)}$. Таким образом, разность квадратов динамической скорости v_* определится выражением (15):

$$(Du/Du_n)^2 - (g/T_0) \cdot L \cdot (Dq/Dq_n) = 0, \quad (15)$$

где u_n, q_n – значения функций, вычисленных для различных z_n ($z_n = z/L$) по приведенным выше формулам, а Du_n, Dq_n – их разность. Поскольку Du, Dq – измеряемые величины, а Du_n, Dq_n зависят от L , то выражение (15) есть неявная функция L , равенство нулю которой будет иметь место только при определенном значении L , для нахождения которого задаются некоторым значением L_{\max} и варьируют его, например: $L_i = DL \cdot i, i = 1, 2, 3, \dots, N, DL = L_{\max}/N$, до тех пор, пока разность $\Delta = \left| (Du/Du_n)^2 - (g/T_0) \cdot L \cdot (Dq/Dq_n) \right|$ не будет равна нулю или ее относительная погрешность (16):

$$\varepsilon = \left| \frac{(Du/Du_n)^2 - \left(\frac{g}{T_0} \right) \cdot L \cdot (Dq/Dq_n)}{(Du/Du_n)^2} \right| \cdot 100\% \quad (16)$$

не будет минимальной (в пределе $\varepsilon = 0$). Найденное значение L^* , при котором ε минимальна, и определит искомое значение масштаба приземного слоя L , определяемого через метеорологические параметры: $L = DLi^*$. Определив L и пересчитав z_n при фиксированных z_1 и z_2 , т.е. пересчитав Dq_n, Du_n , найдем v^* (17):

$$v^* = k(Du/Du_n). \quad (17)$$

Приведенный метод расчета наиболее целесообразен при расчете метеопараметров на ЭВМ. Поскольку параметр L может быть как $L > 0$, так и $L < 0$ (при $L = 0$ режим движения теряет турбулентный характер [3]), то все возможные вариации L_i должны проводиться по формуле: $L_i = DL(N + L - i), i = 1, 2, 3, \dots, N, N + 1, N + 2, \dots, 2N + 1$. В этом случае, если ε_i при некотором i будет минимальным, то параметр L_i вычисляют по последней формуле. Последнее позволит учесть различную стратификацию слоя атмосферы, задаваемую температурным режимом. Для расчета $u_n(z_n), k_n(z_n)$ при найденном L целесообразно пользоваться не таблицами, представленными в работе [2], а аналитическим выражением для $y(z_n)$ как функции z_n (14) [3]. Безразмерные значения этих параметров определены формулами (8),

(7), а размерные – (12). Выбор u_n, q_n по заданному z_n осуществляется следующим образом: при заданном z_n находят $y(z_n)$, по которому находят соответствующие значения u_n или q_n . Аналогично находят значения u_n, q_n для другого значения z_n (другого уровня), вычисляя затем разности $\Delta u_n, \Delta q_n$. После определения параметров L, v^* значения $u(z), k(z)$ находят по формуле (12). Постоянную c_1 в формуле (8) находят при $z = z_0$ и $u(z) \Big|_{z=z_0} = 0$. Значения метеопараметров, характерных для регионов Герегу и Иту в Нигерии в зависимости от сезонов, приведены в таблицах 3 и 4.

Результаты расчетов метеорологических характеристик

Рассчитанные значения метеопараметров v^* и L и средние величины высотных распределений $u(z), k(z)$ и $b(z)$ для выделенных условий в регионах Герегу и Иту в Нигерии приводятся в таблице 5, а для двух различных сезонов в виде графиков на рисунках 2–9.

При расчетах метеопараметров использовались два уровня 30 м и 57 м, а значение температуры уровня земли для соответствующих времен года брали из таблиц 3 и 4. Краткий анализ содержания данных этих таблиц показывает, что основное состояние устойчивости атмосферы можно отнести как к слабоустойчивому. На это указывает небольшая скорость ветра на высоте $z_1 = 57$ м, невысокая разность по температуре и скорости ветра по высоте. На этом, достаточно однородном фоне, наиболее ярко выглядят данные таблицы по региону Герегу в сухой сезон в марте, в котором разность температуры и скорости ветра весьма значительны. В этом месяце характер состояния устойчивости атмосферы соответствует наиболее устойчивому, которое по своим характеристикам существенно отличается, от подобных параметров в иные месяцы года (см. рис. 2). Результаты расчета показывают, что минимум $\varepsilon(i) = \varepsilon_{\min}$ составляет 2,69 при $i = 33$. Вторая характерная особенность, представляющая собой «зигзаг» в области индексов $i \sim 70 - 76$, обусловлена условием расчета, возникающим при переходе от $L_i > 0$ к $L_i < 0$, которую

Таблица 3. Средние метеорологические данные для проектируемой АЭС в регионе Герегу (Штата) Когги, Нигерия (Nimet)**Table 3.** Average meteorological data for the projected NPP in the Geregu (State) region of Kogi, Nigeria (Nimet)

Месяц	Время года	Температура на высоте 57 м, °С	Скорость ветра на высоте 57 м, м/с	Направление ветра на высоте 57 м, °С	Температура на высоте 40 м, °С	Скорость ветра на высоте 40 м, м/с	Направление ветра на высоте 40 м, град	Температура на высоте 30 м, °С	Скорость ветра на высоте 30 м, м/с	Направление ветра на высоте 30 м, °С	Температура на высоте 0 м, °С
Январь	Сухой сезон	32,5	3,5	181,3	30,3	2,9	146,7	30,5	2,7	137,8	28,3
Февраль		36,2	3,2	197,6	36,0	2,7	155,4	34,2	2,4	150,2	28,4
Март		36,0	5,4	260,3	35,8	4,1	238,8	33,0	3,1	197,8	28,9
Апрель	Сезон дождей	32,2	5,4	285,3	33,0	2,9	252,2	30,2	4,1	216,8	28,8
Май		30,4	4,7	281,6	30,1	3,5	250,2	29,4	3,6	214,0	28,7
Июнь		29,1	4,1	279,3	31,0	3,2	248,9	30,1	3,1	212,3	27,1
Июль		30,0	4,6	301,3	28,6	4,5	260,7	28,0	3,5	228,9	26,7
Август		27,6	4,5	294,2	26,2	2,4	256,9	26,6	3,4	223,6	26,0
Сентябрь		28,7	3,7	292,0	30,2	3,0	255,7	27,7	2,8	221,9	26,1
Октябрь		29,9	3,0	241,9	28,5	2,6	229,0	26,9	2,3	183,8	25,6
Ноябрь	Сухой сезон	33,1	3,5	217,0	30,5	2,9	215,7	29,1	2,7	164,9	28,1
Декабрь		33,3	3,5	190,9	32,8	2,8	151,8	30,3	2,7	145,1	28,3

Таблица 4. Средние метеорологические данные для проектируемой АЭС Сайт в Иту штата Аква Ибом, Нигерия (Nimet)**Table 4.** Average meteorological data for the projected NPP Site at Itu in Akwa Ibom State, Nigeria (Nimet)

Месяц	Время года	Температура °С на высоте 57 м,	Скорость ветра на высоте 57 м, м/с	Направление ветра на высоте 57 м, °С	Температура °С на высоте 40 м	Скорость ветра на высоте 40 м, м/с	Направление ветра на высоте 40 м, (град)	Температура на высоте 30 м, °С	Скорость ветра на высоте 30 м, м/с	Направление ветра на высоте 30 м, °С	Температура °С на высоте 0 м
Январь	Сухой сезон	28,5	3,5	150	26,0	3,0	130	24,0	2,5	120	23,5
Февраль		29,0	3,8	130	27,0	3,4	110	26,0	3,0	100	25,0
Март		28,9	3,0	200	27,7	2,1	200	26,2	2,0	190	24,9
Апрель	Сезон дождей	27,5	4,0	220	25,5	2,8	210	23,5	2,6	200	24,5
Май		26,2	2,8	190	24,2	2,5	170	22,2	2,2	160	23,2
Июнь		25,1	3,0	185	25,5	2,0	165	25,0	2,0	155	24,1
Июль		24,1	3,7	230	24,5	3,1	220	22,5	2,4	210	23,1
Август		25,3	3,5	240	23,3	2,8	215	22,3	2,3	205	22,0
Сентябрь		24,6	3,0	210	22,6	2,0	200	21,2	2,0	190	20,6
Октябрь		25,2	2,5	190	25,5	1,9	170	24,0	1,7	160	23,2
Ноябрь	Сухой сезон	26,0	1,5	240	24,0	1,2	200	23,0	1,2	200	22,0
Декабрь		27,9	1,6	110	25,4	1,3	100	24,0	1,2	100	24,6

Таблица 5. Средние значения метеорологических параметров, определяющих перенос субстанции в атмосфере в регионах Герегу и Иту (Нигерия)**Table 5.** Mean values of meteorological parameters determining atmospheric transport of substance in the Geregu and Itu regions (Nigeria)

Месяц	Сезон	V_*	L	\bar{u}	\bar{k}	\bar{b}
Март	Сухой (Гер)	0,149	38	3,175	1,382	0,06
Октябрь	Сухой (Гер)	0,141	1,714	0,56	0,017	0,005
Апрель	Сезон дождей (Иту)	0,03	1,0	1,692	0,034	0,052
Ноябрь	Сухой (Иту)	0,036	4,0	0,567	0,035	0,0035

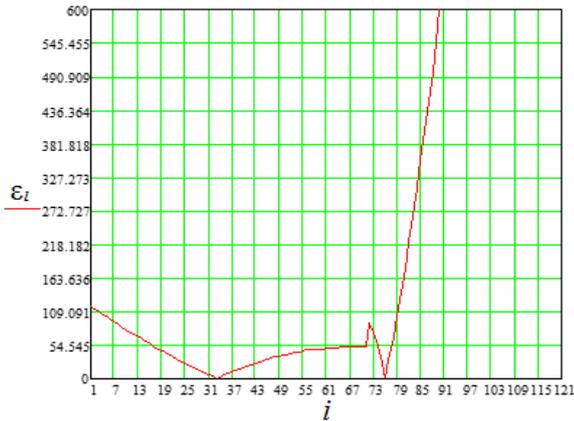


Рисунок 2. Оценка масштаба приземного слоя атмосферы L по индексу i , в котором $\varepsilon(i)$ минимально. Регион Герегу, март (сухой сезон)
Figure 2. Estimation of the scale of the surface atmospheric layer L at index i , where $\varepsilon(i)$ is minimised. Geregu region, March (dry season)

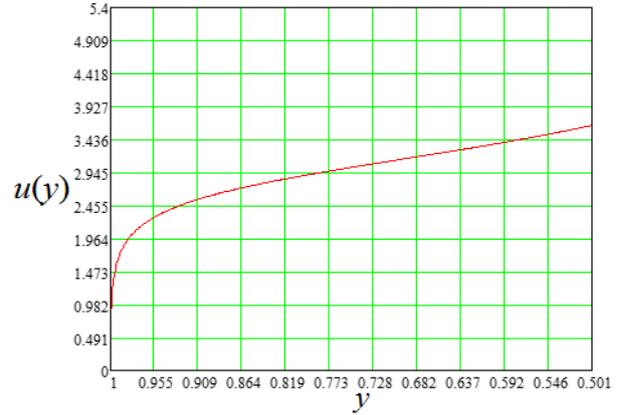


Рисунок 3. Зависимость скорости ветра от высоты. Регион Герегу, март (Сухой сезон)
Figure 3. Dependence of wind speed on altitude. Geregu region, March (Dry season)

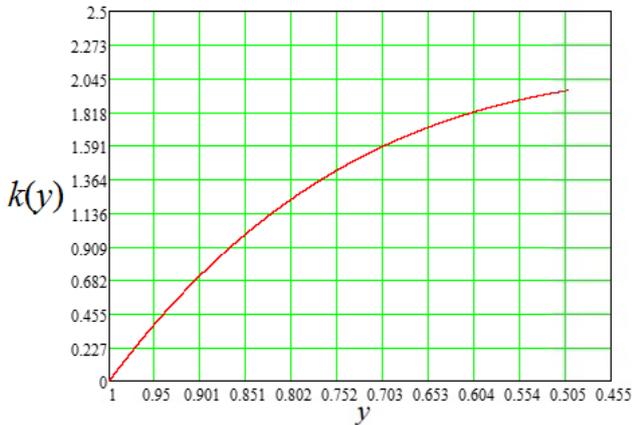


Рисунок 4. Зависимость коэффициента турбулентной диффузии от высоты. Регион Герегу, март (сухой сезон)
Figure 4. Dependence of the turbulent diffusion coefficient on altitude. Geregu region, March (dry season)

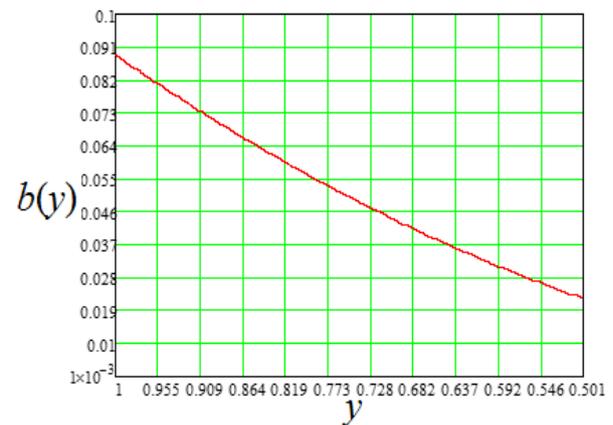


Рисунок 5. Зависимость энергии турбулентных пульсаций от высоты. Регион Герегу, март (сухой сезон)
Figure 5. Dependence of turbulent pulsation energy on altitude. Geregu region, March (dry season)



Рисунок 6. Оценка масштаба приземного слоя атмосферы L по индексу i , в котором $\varepsilon(i)$ минимально. Регион Иту, апрель (сезон дождей)
Figure 6. Estimation of the atmospheric surface layer scale L at index i , where $\varepsilon(i)$ is minimised. Itu region, April (rainy season)

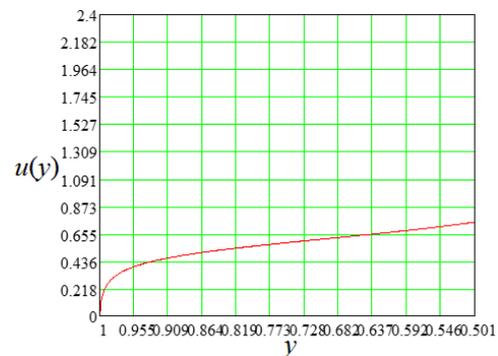


Рисунок 7. Зависимость скорости ветра от высоты. Регион Иту, апрель (сезон дождей)
Figure 7. Dependence of wind speed on altitude. Itu region, April (rainy season)

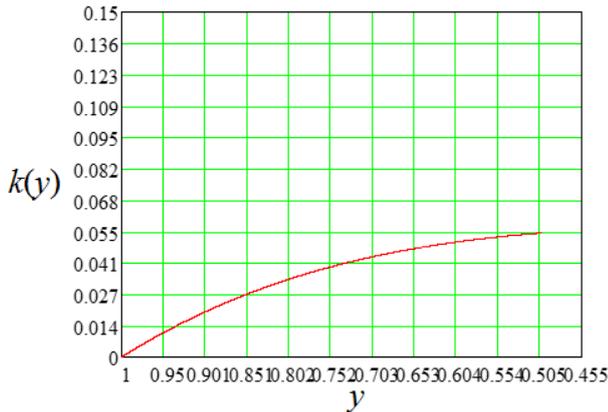


Рисунок 8. Зависимость коэффициента турбулентной диффузии от высоты. Регион Иту, апрель (сезон дождей)

Figure 8. Dependence of turbulent diffusion coefficient on altitude. Itu region, April (rainy season)

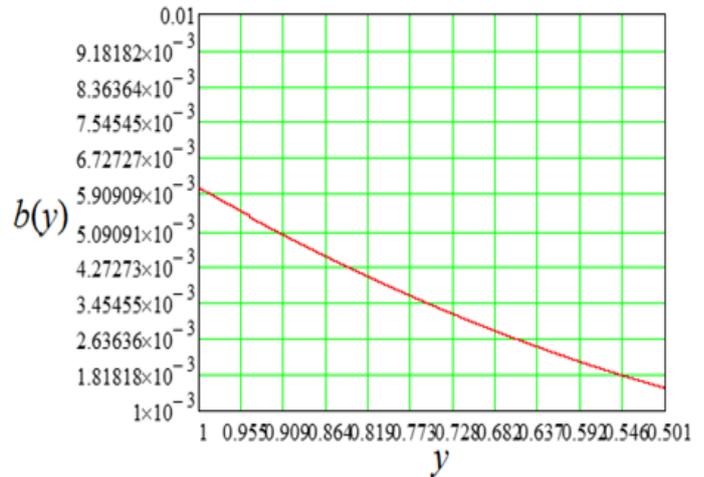


Рисунок 9. Зависимость энергии турбулентных пульсаций от высоты. Регион Иту, апрель (сезон дождей)

Figure 9. Dependence of turbulent pulsation energy on altitude. Itu region, April (rainy season)

при решении рассматриваемых задач не следует принимать во внимание. В дальнейших расчетах получили данные, приведенные в таблице 5 (март), которые позволили провести расчеты скорости ветра, температуры, коэффициента турбулентной диффузии и энергии турбулентных пульсаций как функции высоты, используя формулы (12) (см. рис. 3–5), а на рисунках 6–9 представлены аналогичные графики в сезон дождей в регионе Иту (см. табл. 5). При расчетах использовался пакет Mathcad.

Из графика рисунка 6 следует, что ε_{\min} достигает минимального значения при $i = 67$, а масштаб приземного слоя составляет $L = 4$, остальные средние значения метеопараметров приведены в таблице 5.

Несложный анализ приведенных зависимостей показывает, что метеопараметры, характеризующие состояние устойчивости атмосферы и особенности распространения р/а примеси в условиях радиационных аварий, будут существенно различаться: в сезон дождей приведенные характеристики \bar{u} , \bar{k} , \bar{b} значительно меньше, чем в сухой сезон. Ниже приведем математический аппарат, описывающий перенос примеси в атмосфере в рамках модели турбулентной диффузии.

В рамках этой модели перенос радиоактивной примеси в атмосфере рассчитывают, используя уравнение турбулентной диффузии, полагая при этом,

что размывание примеси по оси Y осуществляется по закону Гаусса, определяя, таким образом, объемную активность примеси выражением (18):

$$\Phi(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp(-y^2/2\sigma_y^2), \quad (18)$$

где $\sigma_y(x)$ – среднеквадратичное отклонение; функция $S(x, z)$ определяется выражением (19):

$$S(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x, y, z) dy = 2 \int_0^{+\infty} \Phi(x, y, z) dy \quad (19)$$

Таким образом, для объемной активности газоаэрозольной примеси получают уравнение (20):

$$u \frac{\partial S}{\partial x} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \quad (20)$$

где $\varphi(x, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z) dy = M\delta(x)\delta(z - h_{эф})$,

$f = M\delta(x)\delta(y)\delta(z - h_{эф})$ – источник газоаэрозольной примеси, загрязняющий окружающую среду;

M – мощность выброса (Бк/с);

$h_{эф}$ – эффективная высота выброса;

σ – постоянная релаксации радиоактивной газоаэрозольной примеси, представляющая собой сумму постоянной вымывания примеси из атмосферы σ_0 (с^{-1}) и постоянной радиоактивного распада, которой пренебрегают, рассматривая перенос радионуклидов с большим периодом полураспада.

В конечном итоге принимают, что $\sigma = \sigma_0$; w – гравитационная скорость осаждения примеси. В рамках рассматриваемой модели переноса величину $\sigma_y^2(x)$ представляют в виде: $\sigma_y^2(x) = \bar{b}x^2/\bar{u}^2(1 + \alpha x\bar{b}/\bar{k}\bar{u})$, где \bar{b} , \bar{k} , \bar{u} – усредненные по приземному слою высотой $H_{\text{пр}} \approx 100$ м значения энергии турбулентных пульсаций $b(z)$, коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$ и скорости ветра $u(z)$, $\alpha = 0,015$:

$$\bar{b} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} b(z) dz}{H_{\text{пр}}}; \quad \bar{k} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} k(z) dz}{H_{\text{пр}}}; \quad \bar{u} = \frac{\int_0^{H_{\text{пр}}} u(z) dz}{H_{\text{пр}}}.$$

$$S(x, z) = \frac{M}{2} \exp\left(-\left[\frac{\sigma_0 x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4\bar{k}\bar{u}} + \frac{w(z-h_{\phi})}{2\bar{k}}\right]\right) \left\{ \frac{\exp\left(-[z+h_{\phi}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x\right) + \exp\left(-[z-h_{\phi}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x\right)}{\sqrt{\pi\bar{k}\bar{u}x}} - \frac{(2\beta-w)}{\bar{k}\bar{u}} \exp\left[-\frac{(2\beta-w)(z+h_{\phi})}{2\bar{k}} + \left(\frac{2\beta-w}{2\bar{k}}\right)^2 \frac{\bar{k}x}{\bar{u}}\right] \times \right. \\ \left. \times \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{2\beta-w}{2\bar{k}}\right) \sqrt{\bar{k}x/\bar{u}} + \frac{(z+h_{\phi})}{2\sqrt{\bar{k}x/\bar{u}}}\right] \right\}, \quad (25)$$

Результаты приведенных на рисунках 2–9 зависимостей дают основание для сравнения осевых ($y = 0$) и поперечных ($x = \text{const}$) распределений радиоактивной примеси при ее распространении в атмосфере с аналогичным распределением, полученным при наличии осадков в сезон дождей в апреле в регионе Иту (Аква Ибом) (рис. 10, 11). Такое сравнение приобретает особую важность, поскольку рассматривается характер распространения р/а примеси при сухом сезоне и в сезоне дождей, в котором следует учитывать вымывания р/а примеси, характеризующееся постоянной σ_0 , что соответствует метеороло-

гическим условиям выбранных регионов в Нигерии.

Граничные условия определяются выражениями (21) – (24):

$$S(x, z)|_{x=0} = 0; \quad (21)$$

$$S(x, z)|_{x \rightarrow \infty} = 0; \quad (22)$$

$$S(x, z)|_{z \rightarrow \infty} = 0; \quad (23)$$

$$k \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w) S|_{z=z_0}, \quad (24)$$

где β – скорость сухого осаждения газоаэрозольной примеси на подстилающую поверхность; z_0 – параметр шероховатости подстилающей поверхности. Аналитическое решение задачи (20) – (24) дается выражением (25), а объемная активность газоаэрозольной примеси радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, вычисляется по формуле (18) [5], [6]:

гическим условиям выбранных регионов в Нигерии.

Из представленных на графиках 10, 11 распределений следует, что зависимость объемной активности, распространяющейся в атмосфере, существенно зависит от значения ее постоянной вымывания из атмосферы σ_0 .

Как уже отмечалось, осевое распределение, полученное в сухой сезон в регионе Герегу (кривая 1), практически не отличается от распределения, слабоустойчивого состояния атмосферы, характерного для Русской равнины. Напротив, в сезон дождей в

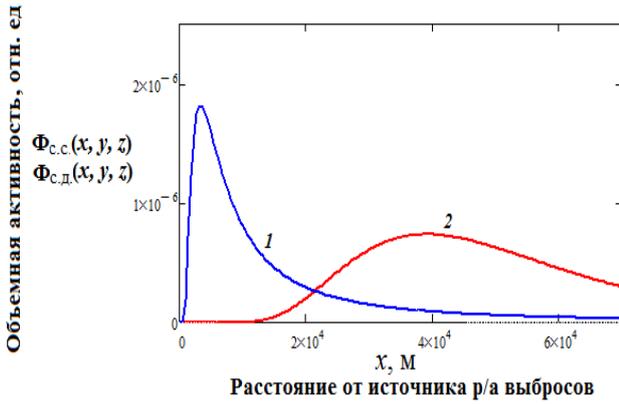


Рисунок 10. Осевые распределения ($y = 0$) объемной активности в регионах Герегу, март (1, сухой сезон, $\sigma_0 = 0$) и Иту, апрель (2, сезон дождей, $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$); $z = 1,5$ м
Figure 10. Axial distributions ($y = 0$) of volume activity in the regions of Geregu, March (1, dry season, $\sigma_0 = 0$) and Itu, April (2, rainy season, $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$); $z = 1.5$ m

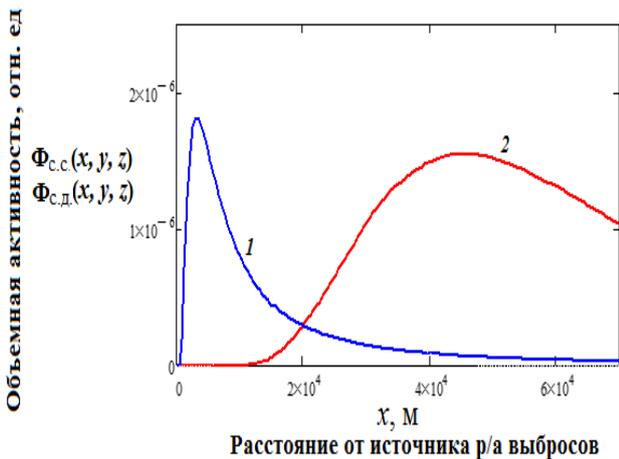


Рисунок 11. Осевые распределения ($y = 0$) объемной активности в регионах Герегу, март (1, сухой сезон, $\sigma_0 = 0$) и Иту, апрель (2, сезон дождей, $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$); $z = 1,5$ м
Figure 11. Axial distributions ($y = 0$) of volume activity in the regions of Geregu, March (1, dry season, $\sigma_0 = 0$) and Itu, April (2, rainy season, $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$); $z = 1.5$ m

регионе Иту (кривая 2) характер распределения имеет существенное отличие, состоящее в том, что в осевом распределении наблюдается широкий максимум, сопровождающийся медленным спадом объемной активности. При высоком значении постоянной вымывания $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$ объемная активность быстро падает (см. рис. 10), хотя характер распределения имеет такой же вид,

как и при меньшем значении постоянной вымывания $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$ (см. рис. 11), но максимум распределения оказывается сдвинутым в сторону больших расстояний от источника выбросов. Некоторое сомнение вызывает «нулевое» значение распределения объемной активности в начале своего распространения. Последнее обусловлено тем, что приведенное распределение характерно для высоты $z = 1.5$ м, где плотность объемной активности на такой высоте еще достаточно низкая, поскольку коэффициент турбулентной диффузии $k(y)$ наряду с поперечным рассеянием примеси $b(y)$ невелики (см. табл. 5). В связи с чем выпадения примеси в этой области под действием гравитационной скорости осаждения w (см. комментарии к формуле (20)), также является низким, что и определяет малое значение величины объемной активности в указанной области.

Прогностические поперечные распределения р/а примеси в выбранных регионах на расстояниях от источника выбросов $x = 4,0 \cdot 10^3$ м (рис. 12) и $x = 3,5 \cdot 10^4$ м (рис. 13) для регионов Герегу и Иту представлены на соответствующих рисунках.

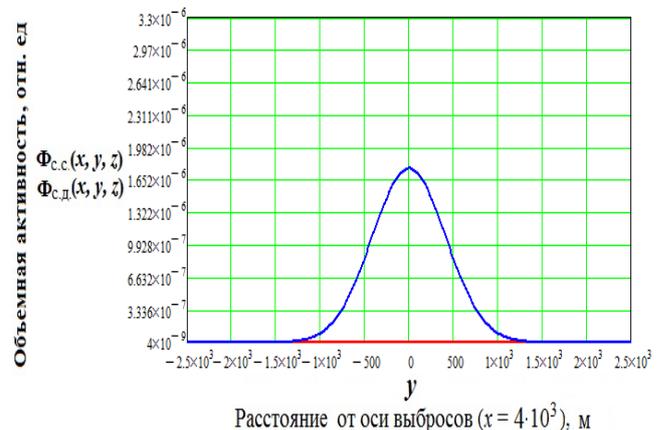


Рисунок 12. Поперечные распределения объемной активности в регионах Герегу, март (1, сухой сезон, $\sigma_0 = 0$) и Иту, апрель (2, сезон дождей, $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$); $z = 1,5$ м
Figure 12. Transverse distributions of volumetric activity in the regions of Geregu, March (1, dry season, $\sigma_0 = 0$) and Itu, April (2, rainy season, $\sigma_0 = 0,57 \cdot 10^{-5}$); $z = 1.5$ m

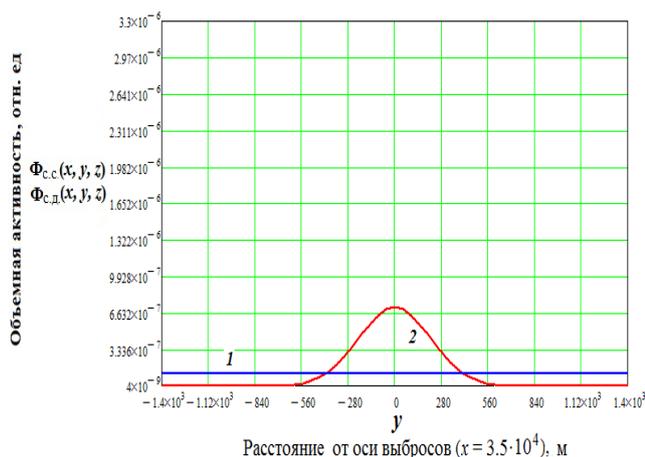


Рисунок 13. Поперечные распределения объемной активности в регионах Герегу, март (1, сухой сезон, $\sigma_0 = 0$) и Иту, апрель (2, сезон дождей, $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$); $z = 1,5$ м

Figure 13. Transverse volume activity distributions in the regions of Geregu, March (1, dry season, $\sigma_0 = 0$) and Itu, April (2, rainy season, $\sigma_0 = 0,87 \cdot 10^{-5}$); $z = 1.5$ m

Как следует из представленных графиков распространения примеси в атмосфере в зависимости от ее состояния устойчивости носит совершенно различный характер. При слабоустойчивом состоянии в сухой сезон в регионе (Герегу) на малых расстояниях характеризуется максимумом (см. рис. 10, 11) и быстро спадает на больших расстояниях (см. рис. 12, 13). Распределение примеси в атмосфере в сезон дождей на небольших расстояниях от источника выбросов пред-

ставляет собой незначительную величину (см. рис. 10, 12) и резко возрастает по мере увеличения расстояния от источника выбросов, достигая своего максимального значения, которое зависит от величины постоянной вымывания примеси дождем, и затем быстро спадает. Максимумы поперечных распределений соответствуют значениям осевых распределений при соответствующих величинах x .

Рекомендации и заключение

Таким образом, полученные результаты расчетов дают наглядное представление об особенностях распространения радиоактивной примеси в атмосфере регионов Герегу и Иту в Нигерии с учетом ее вымывания осадками.

Представленные результаты расчетов следует принимать во внимание при оценке размеров санитарно-защитной зоны, располагаемой вокруг АЭС в том и другом регионах, и необходимого и достаточного количества постов радиационного контроля окружающей среды при их размещении в пределах этих зон, в соответствии с нормативными документами (ОСПОРБ-99/2010, СП 2.6.1.2612-10), а также при определении оптимального пути при эвакуации населения из загрязненного радиоактивными осадками региона [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Орумо К.Б., Елохин А.П., Ксенофонтов А.И. Экологические и социально-экономические аспекты возможного развития атомной энергетики в Федеративной Республике Нигерия. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;4(33):96–109. Режим доступа: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/4_2_4.pdf (дата обращения: 13.05.2024).
Orumo K.B., Elokhin A.P., Ksenofontov A.I. Ecological and socio-economic aspects of the possible development of nuclear energy in the Federal Republic of Nigeria. *Global nuclear safety*. 2019;4(33):96–109. (In Russ.). Available at: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/4_2_4.pdf (accessed: 13.05.2024).
2. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слой атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. 340 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007147806/ (дата обращения: 13.05.2024).
Laichtman D.L. Physics of the boundary layer of the atmosphere. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970. 340 p. Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_007147806/ (accessed: 13.05.2024).
3. Елохин А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды. Москва: НИЯУ МИФИ, 2014. 520 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/103213?ysclid=lzv8g88c6w341484126> (дата обращения: 13.05.2024).

Elokhin A.P. Methods and means of environmental radiation control systems. Moscow: NRNU MEPHI, 2014. 520 p. (In Russ.). Available at: <https://e.lanbook.com/book/103213?ysclid=lzv8g88c6w341484126> (accessed: 13.05.2024).

4. Орумо К.Б., Елохин А.П., Ксенофонтов А.И. Особенности воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты и методы его радиационного контроля на ядерных объектах (Аналитический обзор). *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;2(35):16–40. <https://doi.org/10.26583/gns-2020-02-02>

Orumo K.B., Elokhin A.P., Ksenofontov A.I. Features of the effect of ionizing radiation on biological objects and methods of its radiation control on nuclear facilities (Analytical review). *Global nuclear safety*. 2020;2(35):16–40. <https://doi.org/10.26583/gns-2020-02-02>

5. Елохин А.П., Исса Алалем, Ксенофонтов А.И., Федоров П.И. Метрологические характеристики района АЭС в Иордании. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;3(24):19–34. Режим доступа: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb2017.3.pdf?ysclid=lzv8sqb9wu517276396> (дата обращения: 13.05.2024).

Elokhin A.P., Issa Al alem, Ksenofontov A.I., Fedorov P.I. Meteorological characteristics of the nuclear power plant construction area in Jordan. *Global nuclear safety*. 2017;3(24):19–34. (In Russ.). Available at: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb2017.3.pdf?ysclid=lzv8sqb9wu517276396> (accessed: 13.05.2024).

6. Елохин А.П., Исса Алалем, Ксенофонтов А.И. Метрологические характеристики района АЭС «Бушер» в Иране. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;4(25):23–47. Режим доступа: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2017.4.pdf?ysclid=lzv9320yav258090254>

Elokhin A.P., Issa Alalem, Ksenofontov A.I. Meteorological Conditions of the BushehrNPP area? Iran. *Global nuclear safety*. 2017;4(25):23–47. (In Russ.). Available at: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2017.4.pdf?ysclid=lzv9320yav258090254>

8. Елохин А.П., Холодов Е.А., Жилина М.В. Влияние изменения шероховатости подстилающей поверхности на формирование следа при её радиоактивном загрязнении. *Метеорология и гидрология*. 2008;5:81–91.

Elokhin A.P., Kholodov E.A., Zhilina M.V. The effect of changes in the roughness of the underlying surface on the formation of a trace during its radioactive contamination. *Meteorology and hydrology*. 2008;5:81–91. (In Russ.).

9. Елохин А.П. Выбор оптимального пути следования при эвакуации населения из загрязнённого района. *Атомная энергия*. 1999;87(4):314–316.

Elokhin A.P. Choosing the optimal route for the evacuation of the population from a polluted area. *Atomic Energy*. 1999;87(4):314–316. (In Russ.).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Орумо Б.К. – подготовка метеорологических данных по регионам Нигерии;
Ксенофонтов А.И. – постановка задачи, редактирование текста;
Елохин А.П. – написание статьи, математическая реализация решения задачи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Orumo B.K. – preparation of meteorological data by region of Nigeria;
Ksenafontov A.I. – setting the problem, editing the text;
Elokhin A.P. – writing a paper, mathematical implementation of the problem solution.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Прокопьевич Елохин, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Alexander P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate Member of Russian Academy of Natural Sciences, National Research Nuclear University

член-корреспондент РАН, г. Москва, Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

WoS ResearcherID: F-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Александр Иванович Ксенафонтов кандидат физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6864-9805>

e-mail: seulin@gmail.com

Кенолл Бьенмотей Орумо, заместитель главного научного сотрудника отдела развития атомных электростанций. Комиссия по атомной энергии Нигерии, Абуджа, Нигерия.

<https://orcid.org/0000-0001-6251-1736>

e-mail: orumokenoll@yahoo.com

«MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>

WoS ResearcherID: F-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Aleksander I. Ksenafontov Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6864-9805>

e-mail: seulin@gmail.com

Kenoll B. Orumo, Deputy Chief Research Officer of the Department for the Development of Nuclear Power Plants. Nigeria Atomic Energy Commission, Abuja, Nigeria.

<https://orcid.org/0000-0001-6251-1736>

e-mail: orumokenoll@yahoo.com

Поступила в редакцию 17.07.2024

После доработки 05.09.2024

Принята к публикации 10.09.2024

Received 17.07.2024

Revision 05.09.2024

Accepted 10.09.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.311.25:621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-05>

EDN NICFCO

Оригинальная статья / Original paper



**Модернизация насоса гидropодъема роторов
паротурбинной установки К-1200-6,8/50**

В.П. Поваров  , **Д.Е. Усачев, А.П. Щукин, В.А. Воротников, А.А. Лотарев**

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

(Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация

 nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Аннотация. В недавнем прошлом в отечественной промышленности широко применялось оборудование иностранных производителей. При этом в настоящее время под давлением введённых против России санкций и системных ограничений техническая поддержка эксплуатации подобного сложного оборудования существенно затруднена, или отсутствует. Коллектив Нововоронежской АЭС успешно противостоит подобным вызовам, разрабатывая технические решения, позволяющие продолжать эффективную эксплуатацию импортного оборудования в условиях новой реальности. Один из многочисленных примеров усилий коллектива Нововоронежской АЭС, направленных на обеспечение экономической безопасности и технологического суверенитета России, приведён в данной статье. В процессе эксплуатации энергоблоков с реакторами ВВЭР-1200 были выявлены отказы в работе насосов гидropодъема роторов турбоагрегата фирмы «Allweiler GmbH» (Германия). В рамках программы импортозамещения и повышения надежности оборудования на основе имеющейся документации и сравнительного анализа режимов эксплуатации насосов НГПР на Нововоронежской и Ленинградской АЭС, разработана технология ремонта НГПР с модернизацией внутрикорпусных деталей с помощью установки втулки из бронзы и соблюдения точных зазоров внутрикорпусных устройств насоса. Предложены усовершенствованные схемные решения для системы гидростатического подъема роторов ТА, исключающие повреждения НГПР при работе энергоблока на мощности и в период планово-предупредительного ремонта (ППР). Модернизация оборудования, произведённого в Германии, а также его успешная эксплуатация на Нововоронежской АЭС, является ярким примером научно обоснованного технического ответа на санкционное давление иностранных государств и может распространяться на другие российские предприятия в качестве положительной практики.

Ключевые слова: турбина, ВВЭР, насос гидropодъема роторов, маслосистема, система смазки.

Для цитирования: Поваров В.П., Усачев Д.Е., Щукин А.П., Воротников В.А., Лотарев А.А. Модернизация насоса гидropодъема роторов паротурбинной установки К-1200-6,8/50. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):56–61. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-05>

For citation: Povarov V.P., Usachev D.E., Shchukin A.P., Vorotnikov V.A., Lotarev A.A. Modernisation of rotor hydraulic lift pump of steam turbine unit K-1200-6.8/50. *Global nuclear security*. 2024;14(3):56–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-05>

Modernisation of rotor hydraulic lift pump of steam turbine unit K-1200-6.8/50

Vladimir P. Povarov  , Dmitry E. Usachev, Alexey P. Shchukin,
Vitaly A. Vorotnikov, Alexander A. Lotarev

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

 nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract. Equipment of foreign manufacturers was widely used in the Russian industry in the recent past. At the same time technical support for the operation of such complex equipment is currently significantly hampered or non-existent under the pressure of sanctions and system restrictions imposed on Russia. The Novovoronezh NPP staff is confronting successfully such challenges by developing technical solutions that enable the continued efficient operation of imported equipment under the new reality. One of the many examples of the efforts of the Novovoronezh NPP staff to ensure Russia's economic safety and technological sovereignty is given in this article. During operation of power units with VVER-1200 reactors, failures in operation of turbine unit rotor hydraulic lift pumps of Allweiler GmbH (Germany) were identified. As part of the programme of import substitution and improvement of equipment reliability on the basis of available documentation and comparative analysis of operation modes of turbine unit rotor hydraulic lift pumps at Novovoronezh and Leningrad NPPs, the technology of turbine unit rotor hydraulic lift pumps repair with modernisation of internals by means of installation of bronze bushing and observance of precise clearances of pump internals is developed. Improved circuit solutions for the system of hydrostatic lifting of rotors are proposed which exclude damage to the turbine unit rotor hydraulic lift pumps during operation of the power unit at capacity and during scheduled preventive maintenance. The modernisation of equipment manufactured in Germany and its successful operation at Novovoronezh NPP is a vivid example of a scientifically sound technical response to the sanctions pressure of foreign countries and can be extended to other Russian enterprises as a positive practice.

Keywords: turbine, VVER, rotor hydraulic lift pump, oil system, lubrication system.

Система гидростатического подъема роторов (СГПР) турбоагрегата (ТА) предназначена для гидростатического подъема шеек роторов турбины и генератора с помощью подачи масла под высоким давлением к вкладышам подшипников для уменьшения износа баббита при вращении валоповоротным устройством (ВПУ) при пуске и остановке ТА, а также для облегчения перемещения ротора ТА во время ремонтных операций¹. В состав системы гидроподъема роторов входят насосы гидроподъема роторов (НГПР), пусковые клапаны, предохранительные клапаны, дозирующие устройства, трубопроводы и арматура.

На энергоблоках с ВВЭР-1200 (Нововоронежская, Ленинградская, Белорусская

АЭС), а также на 4-м блоке Белоярской АЭС в соответствии с проектом в качестве насосов гидроподъема роторов используются насосы VHF440R40E7BS-W159L фирмы «Allweiler GmbH» (Германия). Для подачи масла на каждом энергоблоке установлены два винтовых насоса с электродвигателями переменного тока. В период пусковых операций один насос находится в работе, другой – в дежурстве. Схема с двумя насосами обеспечивает максимально безопасную эксплуатацию ТА. Масло из чистого отсека главного маслобака (ГМБ) подается одним рабочим насосом в напорный коллектор системы гидростатического подъема роторов и далее через дозирующие устройства под шейки роторов каждого подшипника.

На напорном маслопроводе каждого НГПР установлены пусковой, предохранительный и обратный клапаны. Пусковой клапан предназначен для облегчения режима пуска насоса и закрывается в течение нескольких секунд по мере роста давления

¹ Поваров В.П., Безручко О.Л., Гусев И.Н., Усачев Д.Е. Паротурбинная установка К-1200-6,8/50 : учебное пособие. – Росатом. – Воронеж: Диамат, 2021. – 499 с.

масла в напорном коллекторе насоса. Предохранительный клапан не допускает увеличения давления масла на напоре насоса сверх допустимого. Срабатывание предохранительного клапана (уставка) настроено на давление 132 кгс/см^2 .

Технологическая схема системы гидроподъема роторов (MVL) приведена на рисунке 1, где MAV – система смазки подшипников MAD.

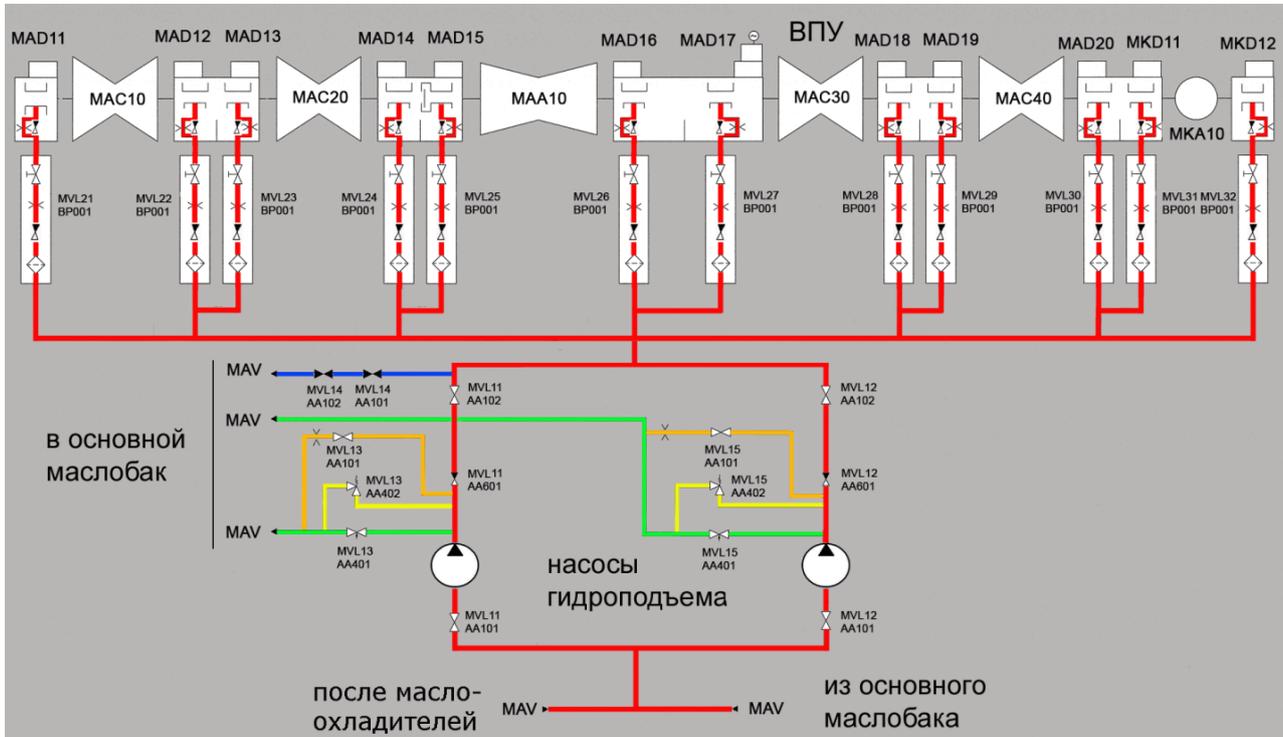


Рисунок 1. Технологическая схема системы гидроподъема роторов
Figure 1. The scheme of the rotor hydraulic lifting system.

Равномерное распределение расхода масла по вкладышам осуществляется дозирующими устройствами. Дозирующие устройства выполнены отдельными блоками и состоят из неотключаемого фильтра, ограничительной (дрессельной) шайбы, шарового обратного клапана и ручного устройства золотникового типа, позволяющего при необходимости отсекать подачу масла на подшипник.

В нижних половинах вкладышей каждого из подшипников выполнена система гидроподъемных камер, обеспечивающих всплытие шейки вала. Масло из вкладышей подшипников ТА сливается в картеры подшипников, откуда по сливным трубопроводам сливается в ГМБ.

Система вводится в работу перед постановкой роторов ТА на ВПУ. Отключение насосов гидроподъема разрешается после закрытия стопорных и регулирующих кла-

панов турбины, снижения температуры металла паровпускных каналов турбины ниже 150°C и отключения ВПУ¹.

Технические характеристики НГПР:

- тип насоса – трехвинтовой насос фланцевого исполнения;
- перекачиваемая среда – огнестойкая жидкость «FYRQUEL»;
- температура перекачиваемой среды – $45 \div 65^\circ\text{C}$;
- давление на выходе – $110\text{-}120 \text{ кгс/см}^2$;
- частота вращения – 2900 об/мин ;
- производительность – $625,8\text{-}649 \text{ л/мин}$.

Корпус НГПР выполнен из стали ZSV. Материал рабочих валов, приводного вала и выравнивающей втулки – из стали 16MnCrS5, 16MnCrS5, G-CuPb15Sn соответственно.

На рисунке 2 приведена конструкция НГПР.

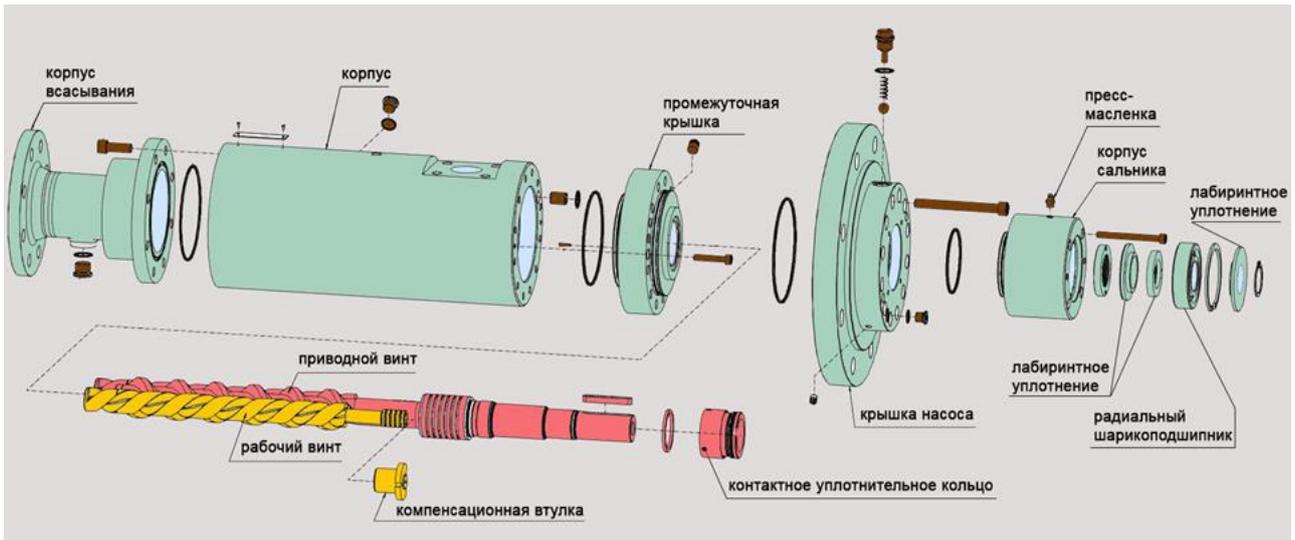


Рисунок 2. Конструкция насоса гидроподъема ротора
Figure 2. Design of the rotor hydraulic lift pump

В процессе эксплуатации на Белоярской и Нововоронежской АЭС (НВАЭС) в период 2016-2023 гг. были выявлены повреждения НГПР. Насос не развивал необходимого давления ($>100 \text{ кгс/см}^2$) для всплытия роторов ТА.

При разборке насосов выявлено отслоение внутреннего антифрикционного покрытия корпуса и увеличение зазоров между рабочим, приводными винтами и внутренней поверхностью корпуса. Состав антифрикционного покрытия, который предназначен для обеспечения зазоров, снижения трения и механического изнашивания при воздействии химически активного реагента «FYRQUEL» на сопрягаемые детали, неизвестен.

Требования заводских инструкций АО «Силловые машины» и производителя насоса к эксплуатации НГПР:

- температура масла при включении насосов гидроподъема должна быть не менее $38 \text{ }^\circ\text{C}$ (п. 4.1.12);

- работа НГПР разрешается при давлении масла во всасывающем коллекторе более $0,1 \text{ кгс/см}^2$. В то же время, в техническом паспорте на насосный агрегат системы гидроподъема роторов указывается, что давление на входе насоса равняется 0 кгс/см^2 , согласно NW20.W.201.&0UMA &&MVL12.021.ZG.0001 «Технический паспорт на электронасосный агрегат гидроподъема турбины».

– в проекте технических условий на турбину паровую К-1200-6,8/50 указано, что насосы гидроподъема должны работать от масляного бака без включения в работу масляного насоса системы смазки (МНС) (п.1.5.3.8). Масло из чистого отсека ГМБ подается НГПР в напорный коллектор системы гидроподъема роторов.

Выполнен сравнительный анализ режимов эксплуатации насосов НГПР на Нововоронежской и Ленинградской АЭС.

При работе блока на мощности всасывающая магистраль НГПР на блоках № 5 и № 6 ЛенАЭС организована с напорной линии системы смазки турбины, а на блоках № 6 и № 7 НВАЭС – с чистого отсека ГМБ. На блоках НВАЭС масло с напорной линии системы смазки турбины подается на всас НГПР только при плановом опробовании насоса.

При планово-предупредительном ремонте на ЛенАЭС и НВАЭС всас НГПР собран с чистого отсека ГМБ системы смазки турбины.

Проанализировав отказы в работе НГПР, предположили, что наиболее вероятная причина повреждения насосов связана с недостаточным подпором на всасе насоса.

При расследовании нарушения в работе АС (Отчет о № 2НВО2-П07-01-01-24 от 25.01.2024) разработчик проекта турбоустановки АО «Силловые машины» предложил обеспечить постоянный подпор

НГПР с напорной линии системы смазки, при этом в руководства по эксплуатации турбоустановки и системы смазки необходимые изменения не внесены.

Это потребовало корректировки эксплуатационной документации (руководств по эксплуатации турбины и системы маслоснабжения). Для работы НГПР с подпором от напорной линии системы смазки в период ППР устанавливаются переключки на подшипниках турбоустановки для обеспечения возможности включения насосов системы смазки при разобранных подшипниках.

Специалистами НВАЭС разработан комплект технологических документов (КТД) на ремонт корпуса насоса, а также комплект чертежей на изготовление ремонтных приспособлений.

Ремонт с модернизацией внутрикорпусных устройств НГПР выполнен в соответствии с разработанным КТД. Выполнена расточка корпуса насоса, изготовлены заготовки из бронзы и их запрессовка в корпус насоса. Выполнено сверление и расточка отверстий по заданным диаметрам в соответствии с КТД.

На рисунке 3 приведена фотография корпуса НГПР с запрессованной втулкой из бронзы. Зазоры между приводными и рабочим винтами насоса соответствуют техническим условиям на насосный агрегат системы гидроподъема роторов типа VHF440 R40E7BS-W159-L.



Рисунок 3. Корпус НГПР с запрессованной втулкой из бронзы

Figure 3. The housing of the rotor hydraulic lift pump with pressed bronze sleeve

В процессе пуско-наладочных работ при включении насоса для опробования после сборки было выявлено задевание приводных винтов за корпус. Для устранения данной проблемы приняты меры по расточке отверстий приводных винтов корпуса на 0,1 мм. После повторных испытаний насоса выявлены повышенные зазоры между разгрузочной втулкой и корпусом. Конструкция втулки узла разгрузки насоса была доработана и изготовлена заново. Работа насоса с модернизированными в условиях Нововоронежской АЭС внутрикорпусными деталями в составе системы гидроподъема роторов не выявила замечаний. При опробовании зафиксировано давление в напорной линии НГПР на уровне 110 кгс/см^2 , что является достаточным для обеспечения безопасной и надежной работы ТА и энергоблока в целом. Надежная работа модернизированного НГПР обеспечила возможность проведения ремонтных и пусковых работ в период ППР-2024 года на оборудовании турбоустановки энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2.

Выводы:

1. Практически реализована технология ремонта с модернизацией внутрикорпусных деталей НГПР производства «Allweiler GmbH» (Германия) с помощью установки внутрикорпусной втулки из бронзы, выдержана максимальная точность зазоров, соответствующих ТУ, между приводными и рабочим винтами насоса.

2. Работа выполнена в рамках программы импортозамещения и повышения надежности нового оборудования.

3. Предложены схемные решения для модернизации системы гидростатического подъема роторов ТА, которые исключают повреждения НГПР при работе блока на мощности и в период ППР. Всасывающий трубопровод НГПР организован с напорной линии системы смазки турбины.

4. НГПР функционирует без замечаний в составе энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Поваров В.П. – концепция технического решения;
Усачев Д.Е. – опробование решения;
Щукин А.П. – разработка схемных решений;
Воротников В.А. – организация ремонта;
Лотарев А.А. – работа с документацией.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Финансирование за счет средств Нововоронежской АЭС.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимир Петрович Поваров, доктор технических наук, директор Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Дмитрий Евгеньевич Усачев, начальник турбинного цеха 4-й очереди Нововоронежской АЭС, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Алексей Павлович Щукин, руководитель Опытного-демонстрационного инженерного центра по выводу из эксплуатации (ОДИЦ), филиал концерна «Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Виталий Алексеевич Воротников, начальник цеха централизованного ремонта Нововоронежской АЭС, г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Александр Алексеевич Лотарев, ведущий инженер цеха централизованного ремонта Нововоронежской АЭС.

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 24.05.2024

После доработки 23.08.2024

Принята к публикации 27.08.2024

AUTHORS' CONTRIBUTION:

V.P. Povarov – the concept of a technical solution;
D.E. Usachev – testing and approbation;
A.P. Shukin – scheme development;
V.A. Vortnikov – repair of the pump;
A.A. Lotarev – documentation.

FUNDING:

Financing from Novovoronezh NPP funds.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir P. Povarov, Vladimir P. Povarov, Dr. Sci. (Engin.), Head of Novovoronezh Nuclear Plant the Branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

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

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Dmitry E. Usachev, Head of the 4th stage turbine shop, Novovoronezh NPP, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Alexey P. Shchukin, Head of the Experimental and Demonstration Engineering Centre of Decommissioning, the branch of Rosenergoatom Concern, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Vitaly A. Vortnikov, Head of the Centralised Repair Shop, Novovoronezh NPP, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Alexander A. Lotarev, leading engineer, Centralised Repair Shop, Novovoronezh NPP, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Received 24.05.2024

Revision 23.08.2024

Accepted 27.08.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.544.8

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-06>

EDN TIPH XV

Оригинальная статья / Original paper



**Обоснование перехода на эрбиевое топливо в реакторах типа ВВЭР-1000
на основе сравнительного анализа коэффициентов реактивности для
гадолиниевого и эрбиевого выгорающих поглотителей**

А.Р. Музафаров  , В.И. Савандер 

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация
 anvar1996@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты нейтронно-физического обоснования замены выгорающего поглотителя гадолиния, размещаемого в небольшом числе твэлов (твэгов), на эрбий, размещаемый во всех твэлах ТВС. Для гадолиниевого поглотителя выбрана схема размещения твэгов, моделирующая их реальное расположение в ТВС с максимальной концентрацией гадолиния в твэгах (8 %). В выбранной схеме твэг, расположенный в центре, симметрично окружен двумя рядами твэлов, с общим их количеством 18 штук. При выборе весового содержания эрбия в твэлах принимается во внимание не только общий компенсируемый запас реактивности за кампанию, но и внутренне присущие свойства безопасности, такие, как плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности по теплоносителю топливной загрузки, что позволяет уменьшить негативное влияние эрбия на выгорание выгружаемого топлива. К тому же однородное расположение эрбия в твэлах приводит к равномерному распределению энерговыделения по сравнению с гадолиниевым поглотителем. Сравнительный анализ нейтронно-физических характеристик реактора для рассматриваемых поглотителей ведется на элементарных ячейках и полиячейках с учетом упрощенных моделей выгорания при частичных перегрузках без перестановок ТВС. При условии применения трехкратной частичной перегрузки топлива в активной зоне образуются повторяющиеся структуры, состоящие из 3 ТВС с различными длительностями облучения. Полученные результаты наглядно демонстрируют что при условии равной компенсации избыточной реактивности коэффициенты реактивности для эрбиевого поглотителя имеют более высокие значения чем для гадолиниевого варианта. С учетом этого фактора можно подобрать такое весовое содержание эрбия в твэлах, при котором потери в выгорании будут незначительны.

Ключевые слова: Гадолиний, эрбий, плотностной коэффициент реактивности, Serpent, полный температурный коэффициент реактивности, ВВЭР, коэффициент размножения, избыточная реактивность, твэл, борный поглотитель.

Для цитирования: Музафаров А.Р., Савандер В.И. Обоснование перехода на эрбиевое топливо в реакторах типа ВВЭР-1000 на основе сравнительного анализа коэффициентов реактивности для гадолиниевого и эрбиевого выгорающих поглотителей. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):62–72. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-06>

For citation: Muzafarov A.R., Savander V.I. Justification of the transition to erbium fuel in VVER-1000 type reactors based on a comparative analysis of reactivity coefficients for gadolinium and erbium burnable absorbers. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):62–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-06>

Justification of the transition to erbium fuel in VVER-1000 type reactors based on a comparative analysis of reactivity coefficients for gadolinium and erbium burnable absorbers

A.R. Muzafarov  , V.I. Savander 

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

 anvar1996@yandex.ru

Abstract. The paper presents the neutron-physical justification of replacement of the burn-up gadolinium absorber placed in a small number of fuel elements by erbium placed in all fuel elements of the fuel assembly. A scheme of fuel elements placement is chosen for the gadolinium absorber, modeling their real arrangement in fuel assemblies with maximum concentration of gadolinium in fuel elements (8%). In the selected scheme the center fuel element is symmetrically surrounded by two rows of fuel elements with the total number of fuel elements of 18. When selecting the weight content of erbium in fuel elements not only the total compensated reactivity reserve for the campaign is taken into account but also intrinsic safety properties such as the density and total temperature coefficients of reactivity on the fuel loading coolant which allows reducing the negative influence of erbium on the burnup of unloaded fuel. In addition, the erbium homogeneous arrangement in fuel elements leads to a uniform distribution of energy release in comparison with the gadolinium absorber. The comparative analysis of neutron-physical characteristics of the reactor is carried out for the considered absorbers on unit cells and polycells taking into account simplified burnup models at partial reloads without fuel assemblies rearrangements. Repetitive structures consisting of 3 fuel assemblies with different irradiation durations are formed under the condition of application of threefold partial fuel reloading in the core. The obtained results clearly demonstrate that the reactivity coefficients for the erbium absorber have higher values than for the gadolinium variant under the condition of equal compensation of excess reactivity. Taking this factor into account, it is possible to select such a weight content of erbium in fuel elements when losses in burnup will be insignificant.

Keywords: Gadolinium, erbium, density coefficient of reactivity, Serpent, total temperature coefficient of reactivity, VVER, multiplication coefficient, excess reactivity, fuel element, boron absorber.

Введение

В настоящее время для повышения экономической эффективности АЭС с реакторами типа ВВЭР осуществляются кампании длительностью 1,5 года. В перспективе рассматривается переход и на двухгодичные кампании. Применение удлиненных кампаний приводит к увеличению запаса реактивности реактора, который необходимо компенсировать как с помощью жидкостной системы, так и с применением выгорающих поглотителей, интегрированных в топливную матрицу [1–2].

Жидкостная система компенсации, основанная на растворении борного поглотителя в теплоносителе, является регулируемой и в силу гомогенного размещения поглотителя по всей активной зоне не вызывает локальных возмущений в распределении потока тепловых нейтронов и энерговыделения. Эти факторы жидкостной системы компенсации избыточной реактивности обеспечивают

критичность реактора в течение всей кампании, практически полное отсутствие борного поглотителя в конце кампании поэтому жидкостное регулирование не влияет на выгорание выгружаемого топлива, которое определяется заданным запасом реактивности на всю кампанию.

Однако наличие в теплоносителе дополнительного поглотителя негативно влияет на плотностной коэффициент реактивности, что накладывает ограничение на предельную концентрацию борного поглотителя в теплоносителе. Поэтому для реализации удлиненных кампаний необходимо использовать выгорающие поглотители, интегрированные в топливную матрицу [3–5].

В реакторах типа ВВЭР для этой цели используется гадолиний в виде оксидного соединения Gd_2O_3 . Основным достоинством этого поглотителя является то, что он полностью выгорает в топливе за одну кампанию. Микросечения радиационного захвата

нейтронов двумя изотопами гадолиния Gd^{155} и Gd^{157} на несколько порядков больше, чем у основного делящегося изотопа U^{235} , поэтому гадолиний размещают в небольшом числе ТВЭгов так, чтобы обеспечить сильную блокировку потока тепловых нейтронов внутри ТВЭга, но при этом частично снижается поток тепловых нейтронов и в окружающих его ТВЭлах. В результате возникает неравномерное распределение энерговыделения по ТВС, характеризуемое небольшим коэффициентом неравномерности. В результате общий коэффициент неравномерности по радиусу активной зоны по сравнению с гомогенным поглотителем (жидкостное регулирование) повышается. Для его компенсации потребуется увеличить количество свежих ТВС, загружаемых в периферийную область активной зоны, что слегка понизит среднее выгорание выгружаемого топлива [6–9].

Если применять слабый поглотитель, как, например, эрбий, то его можно разместить во всех ТВЭлах, создавая гомогенно размещенный поглотитель, который не создает неравномерности энерговыделения по ТВС. Однако слабый поглотитель не полностью выгорает в топливе, так что его остаточное количество отбирает часть полного запаса реактивности, снижая выгорание выгружаемого топлива. Потеря в выгорании тем больше, чем выше содержание эрбиевого поглотителя в топливе подпитки [10–12].

Таким образом и гадолиний, и эрбий приводят к некоторой потере в среднем выгорании выгружаемого топлива по сравнению с жидкостной системой компенсации избыточной реактивности. Количество выгорающего поглотителя, размещаемого в ТВЭлах и ТВЭгах, определяется той долей от полного запаса реактивности, которая остается после применения жидкостной системы с максимальной допустимой концентрацией борного поглотителя в теплоносителе. Сама максимальная концентрация борного поглотителя определяется величиной плотностного и полного температурного коэффициентов реактивности [13–16].

Для обоснования использования эрбия в качестве выгорающего поглотителя в реакторах типа ВВЭР необходимо сопоставить

их параметры внутренне присущих свойств безопасности, а именно, плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности, учитывая влияние на эти коэффициенты реактивности концентрации борного поглотителя в теплоносителе.

Постановка задачи

Рассмотрим влияние борного поглотителя, растворенного в теплоносителе, на коэффициенты реактивности при наличии в топливе выгорающего поглотителя, в качестве которых рассмотрим природный гадолиний и природный эрбий. Наличие борного поглотителя в теплоносителе, который предназначен выполнять роль компенсатора избыточной реактивности в процессе выгорания, оказывает негативное воздействие на величину и знак плотностного коэффициента реактивности.

Отметим тот факт, что в конце топливной кампании, выгружаемые ТВС, содержащие ТВЭги, не содержат выгорающего поглотителя, а теплоноситель не содержит борного поглотителя. Таким образом, выгоревшие ТВС представляют из себя элементарные уран водные ячейки. Поэтому в качестве реперных значений для коэффициентов реактивности их значения для чисто уран-водной ячейки, при этом теплофизические параметры теплоносителя и топлива примем такими же, как и для реактора ВВЭР-1000. Будем рассматривать замкнутую критическую ячейку, для которой $K_{эф} = K_{\infty} = 1$. Для этого необходимо подобрать обогащение топлива, обеспечивающее критичность. Полученные коэффициенты реактивности по плотности и температуре теплоносителя примем за эталонные. В дальнейшем будем рассматривать элементарные ячейки и полиячейки, содержащие как борный поглотитель, так и выгорающие поглотители в топливе.

Рассмотрим влияние борного поглотителя, растворенного в теплоносителе, на коэффициенты реактивности при наличии в топливе выгорающих поглотителей, в качестве которых выбраны природный гадолиний и природный эрбий. Для варианта с эрбиевым поглотителем рассматривается та же самая элементарная ячейка, причем весовое содержание эрбия в топливе задается, а вари-

руется содержание борного поглотителя в теплоносителе и подбирается обогащение топлива для поддержания критичности.

Расчетная модель для варианта с гадолинием имеет более сложную структуру. Рассматривается полячейка, в центре которой находится твэг, окруженный двумя слоями твэлов. Такая полячейка, содержащая два ряда твэлов вокруг твэга, общее количество которых составляет 18 твэлов, моделирует ТВС действующих реакторов ВВЭР, содержащую относительно малое число твэгов в ТВС (рис. 1). Содержание гадолиния в твэгах принята равной 8 % весовых по отношению к топливу. Обогащение топлива подбирается из условия критичности полячейки и одинаково для твэлов и твэгов. Для таких замкнутых полячек будем определять коэффициенты реактивности по плотности и температуре теплоносителя при различных содержаниях борного поглотителя в нем.

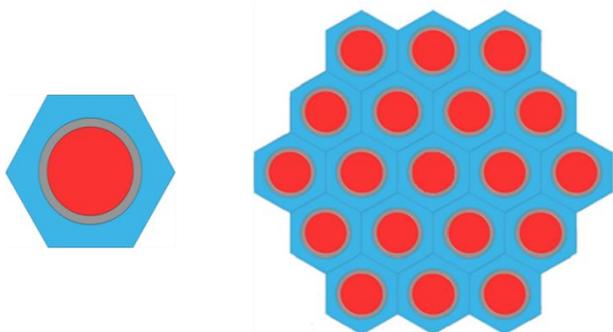


Рисунок 1. Элементарная ячейка и полячейка
Figure 1. Elementary cell and polycell

При анализе результатов необходимо отметить две основные физические величины, которые оказывают наибольшее влияние на плотностной коэффициент реактивности: это величина ϕ – вероятность избежать резонансного поглощения нейтронов в процессе замедления и величина θ – коэффициент использования тепловых нейтронов. Величина ϕ работает как положительная обратная связь, то есть при повышении плотности теплоносителя ϕ возрастает, а величина θ приводит к отрицательной обратной связи, то есть при повышении плотности θ уменьшается.

Наличие выгорающих поглотителей оказывает слабое влияние на величину ϕ и по-

этому главную роль играет изменение величины θ . При использовании гадолиния за счет сильного поглощения тепловых нейтронов происходит блокировка потока тепловых нейтронов в твэге и в ближнем ряду твэлов, так что величина θ уменьшается при большом содержании гадолиния в твэгах, а, следовательно, возрастает роль борного поглотителя за счет увеличения поглощения в теплоносителе. Отметим, что при концентрации борной кислоты в теплоносителе 1 г/кг макросечение поглощения В-10 в два раза больше, чем макросечение поглощения водорода в теплоносителе. Эрбий не блокирует поглощение тепловых нейтронов в твэлах, снижая роль поглощения в теплоносителе. Поэтому отрицательное воздействие повышения поглощения нейтронов, растворенном в воде борном поглотителе будет ниже в эрбиевом варианте, чем в гадолиниевом варианте.

Следовательно, можно ожидать, что плотностной коэффициент реактивности при использовании в качестве выгорающего поглотителя эрбия будет по амплитуде выше, чем при использовании гадолиния в твэгах. Кроме того, и спектральная составляющая полного температурного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя для эрбия будет отрицательной, а по амплитуде выше, чем при использовании твэгов, поскольку изотоп эрбия Er-167 имеет резонанс при энергии 0,41 эВ. При повышении температуры нейтронного газа усредненное по спектру тепловых нейтронов микросечение поглощения гадолиния уменьшается, что также будет способствовать отрицательной величине спектральной составляющей и для гадолиния.

Методика для проведения расчетов

Оценка весового содержания эрбия при переходе на уран-эрбиевое топливо

В расчетах рассматривается ТВС реактора ВВЭР-1000 с обогащением топлива 4,9 %. При выборе весового содержания эрбия необходимо принять во внимание как величину запаса реактивности, компенсируемый гадолинием в действующих реакторах, так и потерю в удельной энерговыработке из-за неполного выгорания эрбия в топливе. Для

оценки запаса реактивности, компенсируемого выгорающими поглотителями, рассматриваются элементарная ячейка для вариантов с эрбием и поляйчейка для варианта с гадолинием. Основной вариант - это применение твэгов с содержанием гадолиния 8 %. Задавая концентрацию борной кислоты в теплоносителе подбираем такое обогащение топлива в твэлах и твэгах так, чтобы поляйчейка была критичной. Для полученного значения обогащения рассчитывается коэффициент размножения элементарной уран-водной ячейки и далее плотностной и полный температурный коэффициенты реактивности. Поскольку для замкнутой ячейки $K_{ЭФ} = K_{\infty}$, то запас реактивности, компенсируемый выгорающими поглотителями, вычисляется обычным путем (1):

$$\rho = \frac{K_{ЭФ} - 1}{K_{ЭФ}}. \quad (1)$$

Плотностной коэффициент реактивности, спектральная составляющая полного коэффициента реактивности и величина полного температурного коэффициента реактивности вычисляются с помощью обычных выражений (2), (3), (4):

$$\frac{\delta\rho}{\delta\gamma} = \frac{\Delta\rho}{\Delta\gamma} = \frac{1}{\Delta\gamma} \times \frac{(K_{\infty}(\gamma \pm \Delta\gamma) - 1)}{K_{\infty}(\gamma \pm \Delta\gamma)}, \quad (2)$$

$$\frac{\delta\rho}{\delta T} = \frac{\Delta\rho}{\Delta T} = \frac{1}{\Delta T} \times \frac{(K_{\infty}(T \pm \Delta T) - 1)}{K_{\infty}(T \pm \Delta T)}, \quad (3)$$

$$\frac{d\rho}{dT} = \frac{\delta\rho}{\delta T} + \frac{\delta\rho}{\delta\gamma} \times \frac{\delta\gamma}{\delta T}, \quad (4)$$

где $\delta\rho/\delta\gamma$, $\delta\rho/\delta T$ и $d\rho/dT$ – плотностной, спектральный и полный температурный коэффициент реактивности;

$\Delta\rho$ – приращение реактивности;

$\Delta\gamma$ – приращение плотности теплоносителя;

K_{∞} – коэффициент размножения нейтронов;

ΔT – приращение температуры теплоносителя;

$\delta\gamma/\delta T$ – теплофизический параметр;

Частичные перегрузки

При частичных перегрузках топлива с перестановками ТВС внутри активной зоны, как это имеет место в действующих реакторах типа ВВЭР, в активной зоне создается

сложная картограмма размещения ТВС с различными длительностями облучения. В этом случае понятие коэффициентов реактивности для всей активной зоны теряют свое значение. Рассмотрим упрощенную схему частичных перегрузок без перестановок. В этом случае в активной зоне образуются структуры из ТВС, типа поляйчек, состоящие из ТВС, отличающиеся числом кампаний в активной зоне. Будем считать, что активная зона состоит из таких поляйчек. Тогда анализ коэффициентов реактивности будем проводить, рассматривая одну замкнутую поляйчку. При трехкратной схеме перегрузки топлива поляйчейка будет состоять из трех ТВС, а именно – ТВС первой, второй и третьей кампании. Получается периодическая структура. Отметим важное обстоятельство для вариантов с использованием гадолиния – во всех ТВС после первой кампании отсутствует выгорающий поглотитель. Это важный фактор, который надо учитывать при расчете коэффициентов реактивности. Так как мы рассматриваем замкнутую поляйчку, то учет утечки нейтронов в реакторе осуществляется путем замены $K_{ЭФ}$ на K_{∞} . Если принять вероятность утечки равной 0,05, то условие критичности будет $K_{\infty}^{CRIT} = 1,05$. Предполагая, что в конце кампании $K_{\infty}^{POLY} = K_{\infty}^{CRIT}$, находим продолжительность кампании по условию (5):

$$K_{\infty}^{POLY}(t) = \frac{K_{\infty}^{TBC}(t) + K_{\infty}^{TBC}(T+t) + K_{\infty}^{TBC}(2T+t)}{3}, \quad (5)$$

где $K_{\infty}^{POLY}(t)$ – коэффициент размножения поляйчейки;

$K_{\infty}^{TBC}(t)$ – коэффициент размножения ТВС;

K_{∞}^{CRIT} – критическое значение коэффициента размножения;

$K_{\infty}^{ЯЧ}(t)$ – зависимость для ячейки периодичности в ТВС, то есть для слоеной цилиндрической ячейки.

Зная продолжительность кампании, находим концентрации нуклидов при этих шагах выгорания и создаем поляйчку, моделирующую активную зону при 3-х кратной перегрузке. Все расчеты проводились в прецизионном программном коде Serpent (2.1.32) с

использованием библиотеки ядерных данных ENDFb7 [17].

Анализ результатов исследования

Перед началом были проведены расчеты значений $K_{\infty}^{TBC}(t)$ с топливом без выгорающих поглотителей для моделей, представленных на рисунке 1. Полученные значения представлены на рисунке 2, причем все они практически совпадают. Это позволяет упростить расчеты, так как указанные ячейки моделируют значения коэффициента размножения ТВС.

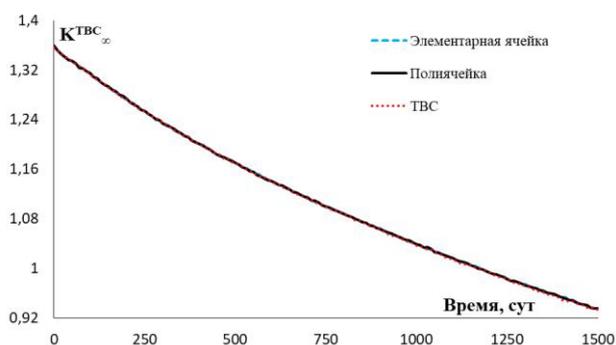


Рисунок 2. Зависимости $K_{\infty}^{TBC}(t)$ для различных моделей

Figure 2. Dependencies $K_{\infty}^{TBC}(t)$ for different models

На первом этапе производился расчет для элементарной ячейки и полячейки. Результаты для эрбия приведены для трех значений весового содержания: 1,1 %, 0,5 % и 0,2 %. Концентрации борной кислоты задавались от 2 г/кг до 8 г/кг с шагом 2 г/кг. Для каждого варианта подбирались обогащение топлива по U-235, при котором соответствующая ячейка или полячейка оказывались критическими. Именно по этому обогащению затем рассчитывался запас реактивности уран-водной ячейки и полячейки, который компенсируется с помощью выгорающих и борного поглотителей.

На рисунке 3 представлены изменения обогащения по урану 235 в элементарной ячейке и полячейке в зависимости от концентрации борной кислоты в теплоносителе.

При сопоставлении варианта с гадолинием с вариантами для эрбиевого топлива, можно отметить, что при содержании эрбия 0,5 % весовых эти зависимости примерно соответствуют друг другу. Следовательно, с точки зрения величины компенсируемой ре-

активности, для замены выгорающего поглотителя гадолиния на эрбиевое топливо весовое содержание эрбия можно принять в районе 0,5 весовых.

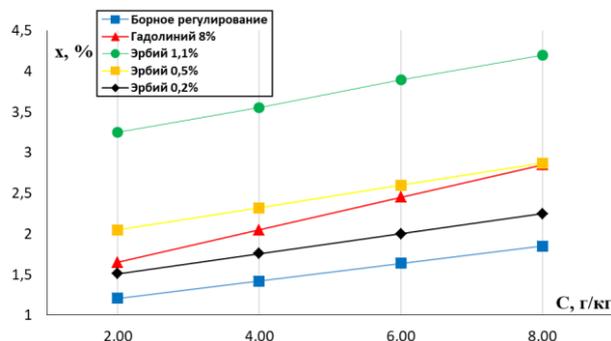


Рисунок 3. Зависимость обогащения по U-235 от концентрации борной кислоты

Figure 3. Dependence of U-235 enrichment on boric acid concentration

Результаты расчетов по коэффициентам реактивности приведены на рисунках 4 и 5, где показаны зависимости относительных значений плотностного и полного температурного коэффициентов реактивности по теплоносителю в зависимости от концентрации борного поглотителя для различного весового содержания эрбия в твэлах по указанной методике для элементарной ячейки и полячейки. Для сопоставления результатов приведены так же зависимости этих коэффициентов реактивности для варианта с гадолинием, весовое содержание которого принято равным 8 %. Все значения взяты по отношению к реперному варианту. Представленные в работе относительные данные имеют меньшую погрешность по сравнению с абсолютными, поскольку источник погрешности один и тот же.

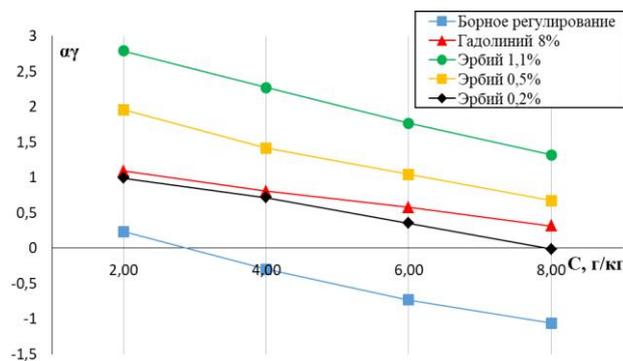


Рисунок 4. Плотностной коэффициент реактивности

Figure 4. Density coefficient of reactivity

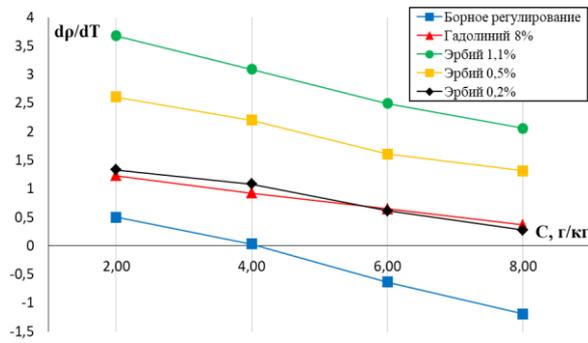


Рисунок 5. Полный температурный коэффициент реактивности

Figure 5. Full temperature coefficient of Reactivity

По представленным относительным значениям можно сделать следующие выводы. Во-первых, для обоих выгорающих поглотителей коэффициенты реактивности по плотности теплоносителя во всем диапазоне изменения содержания борного поглотителя имеют положительные значения, а полный температурный коэффициент реактивности

по температуре теплоносителя для всех вариантов имеет отрицательные значения.

Во-вторых, амплитудные значения коэффициентов реактивности для эрбиевого выгорающего поглотителя выше, чем для гадолиниевого, вплоть до весового содержания эрбия в 0,2 %, при котором они примерно одинаковы. Однако вариант 0,2 % эрбия компенсирует меньший запас реактивности в отличие от гадолиниевого варианта. Поэтому и на основании сравнения коэффициентов реактивности можно сделать вывод о требуемом содержании эрбия в ТВЭлах для замены выгорающего поглотителя гадолиния на эрбий, а именно 0,5 % весовых.

Для построения модели частичных перегрузок без перестановок при 3-х кратной перегрузке в случае с гадолинием был выполнен переход к модели активной зоны (рис. 6). При схеме расположения ТВЭгов 1:18 в ТВС будет находиться 16 ТВЭгов. Аналогичный переход из элементарной ячейки был выполнен для всех вариантов с эрбием.

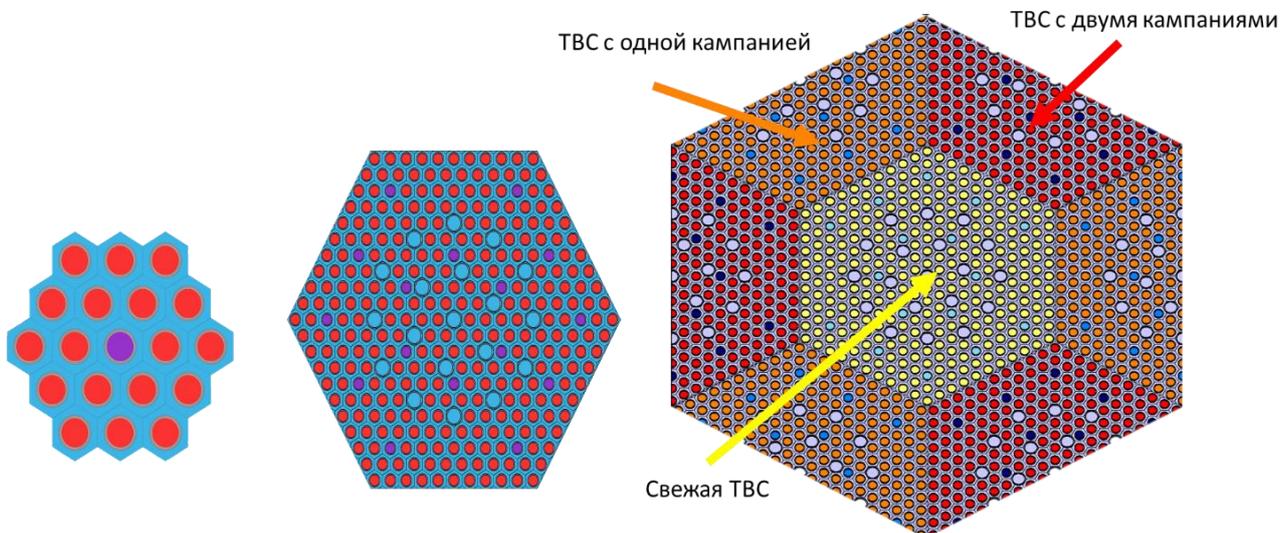


Рисунок 6. Переход с полячейки к модели активной зоны при 3-х кратной перегрузке
Figure 6. Transition from a polycell to a core model with 3-fold refueling

Для всех вариантов с выгорающими поглотителями была выполнена проверка изменения коэффициентов размножения за кампанию для трех моделей рисунках 7 и 8.

Значения коэффициентов размножения при одинаковых концентрациях совпадают для всех моделей. Это доказывает, что водотопливные соотношения моделей одинако-

вые и геометрические размеры рассчитаны правильно. Модель частичных перегрузок (см. рис. 6) собранная из ТВС с различным временем облучения моделирует активную зону реактора ВВЭР при 3-х кратной перегрузке. Согласно представленным графикам, варианты Gd 8 % и Er 0,5 % имеют равный запас на жидкостную систему компенсации.

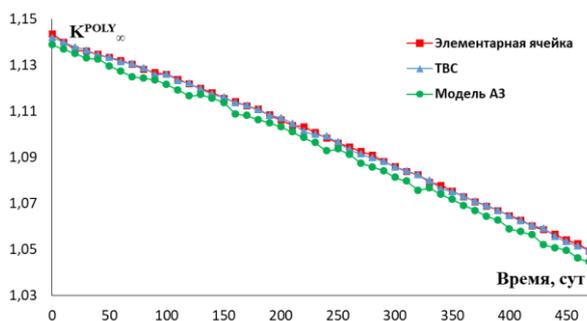


Рисунок 7. Зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для варианта эрбий 0,5%

Figure 7. Dependence $K_{\infty}^{POLY}(t)$ for the erbium 0,5% option

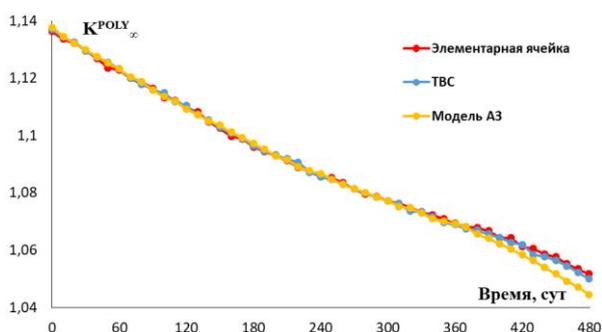


Рисунок 8. Зависимость $K_{\infty}^{POLY}(t)$ для варианта гадолиний 8%

Figure 8. Dependence $K_{\infty}^{POLY}(t)$ for gadolinium 8% option

Далее для модели активной зоны, состоящей из периодической структуры из трех ТВС с различными длительностями кампании топлива, были рассчитаны коэффициенты реактивности и выгорание выгружаемого топлива для варианта с гадолинием и варианта с эрбием, содержание эрбия в топливе было выбрано 0,5 % весовых. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Относительные значения коэффициентов реактивности с использованием модели частичных перегрузок для всех исследуемых вариантов

Table 1. Relative values of reactivity coefficients using the partial overload model for all studied variants

№	Вариант	Плотностной	Полный температурный	Потери в выгорании
1	Er 1,1 %	1,34	1,42	12 %
2	Er 0,5 %	0,78	0,75	2 %
3	Er 0,2 %	0,13	0,15	-
4	Gd 8 %	0,56	0,53	-

Обсуждение полученных данных

При повышении весового содержания эрбия в ТВЭлах увеличивается доля компенсируемого избыточного запаса реактивности и снижается концентрация добавляемого борного поглотителя в теплоноситель для достижения критичности. К тому же, исходя из табличных значений, улучшаются значения коэффициентов реактивности. По этой причине максимальные значения достигнуты для варианта с весовым содержанием эрбия 1,1 %. Однако при этом увеличиваются потери в выгорании выгружаемого топлива.

В связи с тем, что варианты эрбий 0,5 % и гадолиний 8% имеют равный начальный запас, то для этих вариантов использовалась одинаковая концентрация борной кислоты. Данное условие позволяет оценить изменения параметров безопасности для эрбия и гадолиния при равном влиянии борного поглотителя в теплоносителе. В связи с большой блокировкой потока тепловых нейтронов в ТВЭге, вызванной большим весовым содержанием гадолиния, это приводит к увеличению поглощения на боре в теплоносителе и снижается значения плотностного коэффициента реактивности по сравнению с эрбием. В случае с эрбием однородное расположение не приводит к депрессии потока и как результат влияние поглощения на боре не играет существенной роли, как это происходит в варианте с гадолинием. Более высокие значения полного температурного коэффициента реактивности обусловлено резонансом эрбия-167 в тепловой области, как указывалось выше. При этом для варианта с эрбиевым поглотителем достигнуты пренебрежительно малые потери в выгорании 2%. Полученные расчетные значения для элементарных ячеек, полячек и модели частичных перегрузок полностью совпадают с предположениями, выдвинутыми ранее.

Заключение

В представленной работе анализировалась замена гадолиниевого поглотителя на уран-эрбиевое топливо при переходе на удлиненные топливные кампании при частичных перегрузках исходя из характеристик безопасности, точнее плотностного и

полного температурного коэффициентов реактивности. Расчеты были выполнены в два этапа, для элементарных ячеек и полиячеек на первом и на модели частичных перегрузок на втором этапе. При этом полученные данные для этих моделей хорошо совпадают между собой.

В широком диапазоне изменения содержания борного поглотителя в теплоносителе значения плотностного и полного температурного коэффициента реактивности для вариантов с эрбием в качестве выгорающего поглотителя имеют более высокие амплитудные значения, чем для варианта с гадолинием. Показана тенденция возрастания амплитудных значений указанных коэффициентов реактивности, по мере возрастания весового содержания эрбия в ТВЭлах. Для варианта с максимальным весовым содержанием гадолиния в ТВЭгах был подобран вариант с весовым содержанием эрбия, при котором компенсируется одинаковая избыточная реактивность без потерь в выгорании топлива с эрбием.

При этом исходя из полученных значений при трёхкратной перегрузке оптимальное весовое содержание эрбия будет находиться в пределах 0,2 % – 0,5 %, но ближе к 0,5 %. Учитывая, что весовое содержание берется

по отношению к топливу. При переходе на массовые единицы это примерно составит от 1,030 кг до 2,576 кг эрбия на одну ТВС. В этом случае не будет происходить проигрыш в выгорании и будут получены такие же коэффициенты реактивности, как в случае с гадолинием. При этом за счет снижения весового содержания поглотителя в топливе увеличится доля урана, что позволит увеличить энерговыработку. Последнее условие важно для создания запаса реактивности при переходе на двухгодичные топливные кампании. При изменении кратности, включая и дробные кратности, меняется запас реактивности, на одну кампанию, который и надо компенсировать в том числе и эрбием. С увеличением кратности запас реактивности падает, следовательно, весовая доля эрбия будет снижаться. И, наоборот, при снижении кратности запас реактивности растет. В той же пропорции будет расти и весовая доля эрбия в топливе. Однородное расположение эрбия не приведёт к неравномерности поля энерговыделения, избыточный запас реактивности на протяжении всей кампании будет снижаться. Заметим, что наш результат получен для упрощенной модели и результаты расчетов по программе БИПР могут слегка измениться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Савандер В.И., Альсассф С.Х. Анализ эффективности применения удлиненных кампаний на зарубежных АЭС с реактором типа ВВЭР. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2019;10(1):5–8. <https://doi.org/10.1134/S2079562918040152>
2. Хащламунов Т.М., Выговский С.Б. Исследование возможности повышения экономичности использования топлива на АЭС с ВВЭР-1000 для 18-ти месячного топливного цикла. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2018;9(2):107–116. <https://doi.org/10.1134/S2079562917060100>
3. Бергельсон Б.Р., Белоног В.В., Герасимов А.С., Тихомиров Г.В. Глубина выгорания ядерного топлива ВВЭР с разными поглотителями. *Атомная энергия*. 2010;109(4):194–197. Режим доступа: <http://ap.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1513> (дата обращения: 20.05.2024).
4. Bergelson B.R., Belonog V.V., Gerasimov A.S., Tikhomirov G.V. VVER nuclear fuel burnup with different absorbers. *Atomic energy*. 2011;109:240–245. <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9351-2>
5. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР для снижения доли запаса реактивности, компенсируемого жидкостной системой при удлиненных кампаниях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;2(43):42–54. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-05>
6. Khoshaval F., Foroutan Sh. Sh., Zolfaghari A., Minuchehr H. Evaluation of burnable absorber rods effect on neutronic performance in fuel assembly of WWER-1000 reactor. *Annals of nuclear energy*. 2016;87:648–658. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.012>
6. Музафаров А.Р., Савандер В.И. Использование выгорающих поглотителей для снижения водообмена при жидкостном регулировании в реакторах типа ВВЭР. *Атомная энергия*.

2023.134(5–6):216–221. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5300/0> (дата обращения: 01.06.2024).

Muzafarov A.R., Savander V.I. Use of burnable absorbers for reducing water exchange during the VVER liquid control. *Atomic energy*. 2023. 134:290–298. <https://doi.org/10.1007/s10512-024-01057-z>

7. Galperin A., Segev M., Radkowsky A. Substitution of the Soluble Boron Reactivity Control System of a Pressurized Water Reactor by Gadolinium Burnable Poisons. *Nuclear technology*. 1986;75(2):127–133. <https://doi.org/10.13182/NT86-A33855>

8. Hwanyeal Y., Mohd-Syukri Y., Yonghee K. A reduced boron ORP100 core based on the BigT burnable absorber. *Nuclear engineering and technology*. 2016;75:127–133. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.12.010>

9. Абу Сондос М.А., Демин В.М., Савандер В.И. Снижение объема борного регулирования запаса реактивности при использовании выгорающего поглотителя на основе (GD₂O₃) в топливе реактора ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;3(32):56–65. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qkvcfe&ysclid=ly1ivnaec1851156176> (дата обращения: 10.06.2024).

Abu Sondos M.A., Demin V.M., Savander V.I. Decrease the Volume of Boric Regulation of the Reactivity when Using the Burnable Absorber on the Basis of (GD₂O₃) in the Fuel Reactor WWER-1200. *Global nuclear safety*. 2019;3(32):107–116. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qkvcfe&ysclid=ly1ivnaec1851156176> (accessed: 10.06.2024).

10. Muzafarov A.R., Savander V.I. Use of Erbium as a Burnable Absorber in VVER-Type Reactors in a Closed Fuel Cycle. *Physics of atomic nuclei*. 2023;86(12):2569–2576. <https://doi.org/10.1134/S1063778823120049>

11. Альсасаф С.Х., Савандер В.И., Хассан А.А. Использование эрбия в качестве выгорающего поглотителя в реакторах типа ВВЭР при работе на удлиненных кампаниях. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2020;3:62–71. <https://doi.org/10.26583/npe.2020.3.06>

Alassaf S.H., Savander V.I., Hassan A.A. Use of erbium as a burnable absorber for the VVER reactor core life extension. *Nuclear energy and technology*. 2020;6(4):275–279. <https://doi.org/10.3897/nucet.6.60563>

12. Pavlovichev A., Kosourov E., Shcherenko A. [et al.] Use of erbium as burnable poison for VVER reactors. *Kerntechnik*. 2013;78(4):272–279. <https://doi.org/10.3139/124.110371>

13. Недобежкин А.С., Савандер В.И., Музафаров А.Р. Сравнительный анализ коэффициентов реактивности для гадолиниевого и эрбиевого выгорающего поглотителя при использовании на удлиненных кампаниях в реакторах типа ВВЭР. Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2024)». Обнинск, 2024. С. 43–44. https://www.ippe.ru/images/science_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf (дата обращения: 20.06.2024).

Nedobezhkin A.S., Savander V.I., Muzafarov A.R. Comparative analysis of reactivity coefficients for gadolinium and erbium burnable absorbers when used in extended campaigns in VVER reactors. Collection of abstracts of reports of the scientific and technical conference «Neutronic-physical problems of nuclear energy» (Neutronics-2024). Obninsk 2024. P. 43–44. (In Russ.). Available at: https://www.ippe.ru/images/science_info/conference/neutron2024/thesis-nf-2024.pdf (accessed: 20.06.2024).

14. Hafez N., Shahbunder H., Amin E., Elfiki S.A., Abdel-Latif A. Study on criticality and reactivity coefficients of VVER-1200 reactor. *Progress in Nuclear Energy*. 2021;131:1–16. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103594>

15. Зимин В.Г., Выговский С.Б., Семёнов А.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Расчетный анализ экспериментов по определению коэффициентов реактивности на ВВЭР-1000 3-го блока Калининский АЭС с помощью программного комплекса ПРОСТОР. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов*. 2013;4:34–45. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21005029&ysclid=ly1jewaier545937988> (дата обращения: 25.06.2024).

Zimin V.G., Vygovsky S.B., Semyonov A.A., Davidenko V.D., Tsubulsky V.F. Calculation analysis of experiments to determine reactivity coefficients at VVER-1000 unit 3 of the Kalinin NPP using the PROSTOR software package. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika yadernykh reaktorov*. 2013;4:34–45. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21005029&ysclid=ly1jewaier545937988> (accessed: 25.06.2024).

16. Faghihi F., Fadaie A.H., Sayareh R. Reactivity coefficients simulation of the Iranian VVER-1000 nuclear reactor using WIMS and CITATION codes. *Progress in nuclear energy*. 2007;49:68–78. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2006.09.003>

17. Leppänen J. Serpent – a Continuous – energy Monte Carlo reactor physics burnup calculation code. VTT Technical Research Centre of Finland. (June 18, 2015). Available at: https://serpent.vtt.fi/serpent/download/Serpent_manual.pdf (accessed: 30.06.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Музафаров А.Р. – анализ предметной области, проведение нейтронно-физических расчетов и обработка полученных данных согласно поставленной задаче;

Савандер В.И. – постановка задачи, руководство научно-исследовательской работой и проверка результатов, редактирование текста статьи

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Внешнее финансирование отсутствует.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Анвар Рустамович Музафаров, аспирант кафедры теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-5292-2697>

e-mail: anvar1996@yandex.ru

Владимир Игоревич Савандер, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-9309-5616>

e-mail: visavander@mephi.ru

Поступила в редакцию 14.06.2024

После доработки 02.09.2024

Принята к публикации 05.09.2024

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Muzafarov A.R. – analyzing the subject area, carrying out neutron-physical calculations and processing of the obtained data according to the set task;

Savander V.I. – setting the task, directing the research work and checking the results, editing the text of the article.

FUNDING:

There is no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Anvar R. Muzafarov, Postgraduate student, Department of Theoretical and Experimental Physics of Nuclear Reactors, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-5292-2697>

e-mail: anvar1996@yandex.ru

Vladimir I. Savander, Can. Sci. (Phys.& Math.), Senior Researcher, Associate Professor, Department of Theoretical and Experimental Physics of Nuclear Reactors, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-9309-5616>

e-mail: visavander@mephi.ru

Received 14.06.2024

Revision 02.09.2024

Accepted 05.09.2024

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 621.039:378

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-07>

EDN WRXCSJ

Оригинальная статья / Original paper



Формирование и развитие человеческого потенциала предприятий
атомного энергетического машиностроения

М.В. Головкин¹  , В.А. Руденко² , С.А. Томилин² , В.Е. Довбыш² 

¹Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Россия

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

 golovko178@mail.ru

Аннотация. В статье проведен анализ специфики формирования человеческого потенциала предприятий атомного энергетического машиностроения в соответствии с перспективными трендами стратегического развития. Целью представленной научно-исследовательской работы является изучение тенденций развития кадров промышленных предприятий на основе эффективного взаимодействия с образовательными организациями. Изучение лучших практик на примере филиала отраслевого вуза позволило определить направления совершенствования и сформировать прикладной кейс, который может стать объектом бенчмаркинга для других вузов, вне зависимости от их отраслевой направленности. **Методология и методы.** Для исследования тенденций в области формирования и развития человеческого потенциала предприятий атомного энергомашиностроения применялись общенаучные методы (теоретический анализ научных публикаций, эмпирический, логический и аналитический методы), методы стратегического анализа, графический метод. Были использованы экспертные оценки и аналитические обзоры специалистов различных дивизионов Росатома. Проведен обзор публикаций и определена предметная область статьи. **Результаты.** Рассмотрены основные направления стратегического развития Росатома и его машиностроительного дивизиона, определен вектор кадровых запросов. Проанализированы результаты исследований проблемы взаимодействия образовательных организаций и промышленных предприятий, выявлены основные формы, методы и инструменты. Определены способы и направления вовлечения в проекты развития организаций востребованных компетенций. Предложен в качестве объекта бенчмаркинга положительный опыт ВИТИ НИЯУ МИФИ в области подготовки профильных специалистов для промышленных предприятий и организаций Росатома. Рассмотрены преимущества, реализуемые мероприятия и ориентиры образовательной организации, используемые методики подготовки выпускников в интересах развития человеческого потенциала промышленных партнеров. Сформулированы ключевые задачи по развитию человеческого потенциала для решения совместными усилиями образовательной организацией и предприятиями-работодателями. Выявлено значение навыков проектной работы как основного формата инновационных проектов дивизионов Росатома и предложен алгоритм их развития у магистрантов выпускного курса. **Обсуждение.** Эффективное взаимодействие предприятий с образовательными организациями является одним из ключевых решений проблемы кадрового дефицита и актуализации структуры компетенций молодых специалистов, позволяющих обеспечить устойчивый экономический рост предприятий атомного энергетического машиностроения в контексте стратегических ориентиров проектов развития организаций. Тем не менее, требуется постоянная адаптация используемых методик и практик к меняющимся требованиям внешней среды, вовлечение новейших цифровых решений и перспективный подход к выявлению кадровых потребностей.

Ключевые слова: человеческий потенциал, промышленные предприятия, Росатом, компетенции, образовательные организации, машиностроительный дивизион, ВИТИ НИЯУ МИФИ.

Для цитирования: Головко М.В., Руденко В.А., Томилин С.А., Довбыш В.Е. Формирование и развитие человеческого потенциала предприятий атомного энергетического машиностроения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):73–86. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-07>

For citation: Golovko M.V., Rudenko V.A., Tomilin S.A. Dovbish V.E. Formation and development of the human potential of nuclear power engineering enterprises. *Global nuclear safety*. 2024;15(2):73–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-07>

Formation and development of the human potential of nuclear power engineering enterprises

Maria V. Golovko ¹  , Valentina A. Rudenko ² , Sergey A. Tomilin ² 
Viktoria E. Dovbish ² 

¹KUBAN State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

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

 golovko178@mail.ru

Abstract. The article analyses the specifics of human potential formation of nuclear power engineering enterprises in accordance with the perspective trends of strategic development. The purpose of the presented research work is to study the trends of industrial enterprises' personnel development on the basis of effective interaction with educational organisations. The study of best practices on the example of a higher education institution branch allows to identify areas of improvement and form an applied case, which can become an object of benchmarking for other higher education institutions, regardless of their industry focus. **Methodology and Methods.** General scientific methods (theoretical analysis of scientific publications, empirical, logical and analytical methods), methods of strategic analysis, and the graphical method are used to study trends in the field of formation and development of human potential of nuclear power engineering enterprises. Expert assessments and analytical reviews of specialists from various divisions of Rosatom are used. A review of publications is conducted and the subject area of the article is determined. **Results.** The main directions of strategic development of Rosatom and its engineering division are considered, the vector of personnel requests is determined. The results of research on the problem of interaction between educational organisations and industrial enterprises are analysed, the main forms, methods and tools are identified. The ways and directions of involving in the development projects of organisations of the required competencies are determined. The positive experience of VETI NRNU MEPhI in the field of training specialists for industrial enterprises and organisations of Rosatom is proposed as an object of benchmarking. The advantages, implemented activities and guidelines of the educational organisation, used methods of training graduates for the development of human potential of industrial partners are considered. The key tasks for the development of human potential are formulated to be solved jointly by an educational organisation and employer enterprises. The importance of project work skills as the main format of innovative projects of Rosatom divisions is revealed and an algorithm for their development among graduate students is proposed. **Discussion.** Effective interaction of enterprises with educational organisations is one of the key solutions to the problem of personnel shortage and updating the competence structure of young specialists, which allows for sustainable economic growth of nuclear power engineering enterprises in the context of strategic guidelines for the development of organisations. Nevertheless, it requires constant adaptation of the methods and practices used to the changing requirements of the external environment, the involvement of the latest digital solutions and a promising approach to identifying personnel needs.

Keywords: human potential, industrial enterprises, Rosatom, competencies, educational organizations, machine-building division, VITI NIYAU MEPhI.

Введение

Формирование и развитие человеческого потенциала остается одним из важнейших вопросов современности. Для промышленных предприятий, инновационно активных, с высокой долей наукоемкой продукции, актуальные профессиональные навыки сотрудников являются залогом развития. При отсутствии стратегического подхода к управлению развитием человеческих ресурсов это может превратиться в проблему, ведущую к утрате конкурентоспособности.

На протяжении многих лет сохраняется тенденция трансформации профессиональной структуры общества, дефицита квалифицированных кадров в высокотехнологичных отраслях, нехватки специалистов, способных к решению межфункциональных задач, обладающих системным и стратегическим мышлением. Решение проблемы заключается в комплексном подходе к формированию компетенций и поддержке профессионализма кадров в актуальном состоянии, в участии всех заинтересованных сторон – не только образовательных организаций, но и предприятий-работодателей и самих сотрудников.

Достаточно развитыми являются различные алгоритмы партнерского взаимодействия в данной области, функционируют специализированные структуры, адаптируются образовательные процессы. В частности, созданы отраслевые центры компетенций (далее – ОЦК) в целях обеспечения подготовки кадров по запросам предприятий и организаций различных отраслей, одним из эффективных примеров которых является ОЦК Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (Росатом). Ориентиры ОЦК направлены на профессиональное развитие не только сотрудников Росатома, но и преподавателей и студентов опорных вузов, путем разработки и реализации интенсивов по наиболее востребованным навыкам.

Методология и методы

Для исследования тенденций в области формирования и развития человеческого потенциала предприятий атомного энергомашиностроения применялись общенаучные

методы (теоретический анализ научных публикаций, эмпирический, логический и аналитический методы), методы стратегического анализа, графический метод. Были использованы экспертные оценки и аналитические обзоры специалистов различных дивизионов Росатома.

Анализ научной литературы по заявленной тематике показал достаточно высокую степень разработки проблемы. Вопросы эффективности взаимодействия образовательных организаций и промышленных предприятий в рамках проектного обучения, являющегося сегодня очень перспективным, рассмотрены в работах Симоновой Г.В. [1], Кармановой О.В., раскрывающей особенности индустрии 4.0 и требований, предъявляемых работодателями к компетенциям выпускников [2]. Родригес С.Б. отмечает важность формирования цифровых компетенций у студентов инженерных специальностей на основе проектно-ориентированного подхода с применением автоматизированного проектирования NX от Siemens PLM Software [3]. Проблемы качественного взаимодействия вузов и работодателей, а также пути их решения на основе обеспечения удовлетворенности ресурсами всех заинтересованных сторон, раскрыты в исследовании Паршиной В.С. [4]. Особого внимания заслуживают работы Угнич Е.А. и Флека М.Б., в которых представлены особенности формирования soft- и hard-skills (мягкие и жесткие навыки) в рамках базовых кафедр [5], путем формирования профессионально-образовательной экосистемы, включающей дуальное обучение и позволяющей учитывать текущие и перспективные кадровые запросы предприятий [6]. Преимущества сетевого взаимодействия вузов и промышленных предприятий в направлении формирования и развития кадрового потенциала для обеспечения инновационной деятельности, особенно при подготовке магистров, рассмотрены в работах Сулейманкадиева А.Э. [7], Кадочиговой А.Н. [8], Семенко И.Е. [9]. Определенные наработки в рамках данного тематического направления есть и у авторов статьи, которые будут положены в основу дальнейшего исследования [10, 11].

В то же время, динамика внешней среды весьма активна, что приводит к необходимости постоянного пересмотра и корректировки кадровых стратегий, а также отраслевая и региональная специфика диктуют особые требования к компетенциям и способам их формирования. В настоящей статье рассмотрим особенности кадровых запросов и стратегий предприятий машиностроительного дивизиона Росатома, а также опыт филиала отраслевого вуза (ВИТИ НИЯУ МИФИ).

Результаты и обсуждения

Высокий уровень осознанности значения человеческого капитала для повышения конкурентоспособности, тем более, в условиях дефицита высококвалифицированных кадров, демонстрируют крупные рыночные игроки и корректируют свои стратегии развития, ориентируя их на людей. Политика человекоцентричности характерна для Росатома с момента основания.

Развитие новой атомной энергетики, бизнеса в области ядерной медицины, композитных материалов, аддитивных технологий, цифровых решений, экологических проектов и проч., предполагает работу «на переднем крае инноваций». Это приводит к потребности в ученых, инженерах, конструкторах, экологах, ИТ-специалистах, а также представителях рабочих специальностей.

В результате работы над решением данной задачи, была выстроена экосистема развития кадрового потенциала (рис. 1), которая включает различные уровни образования, начиная со школьного. Раннее выявление способностей к инженерному поиску, начиная со средней школы, обладает высокой профориентационной ценностью, облегчает выбор будущих направлений для самореализации школьников, а также позволяет обеспечить системную качественную подготовку специалистов для различных подразделений.

Возможности непрерывного образования реализуются через Корпоративную Академию Росатома, в портфеле которой:



Рисунок 1. Структура экосистемы развития кадрового потенциала Росатома¹

Figure 1. The ecosystem structure of the development of Rosatom human resources¹

- более 300 учебных программ;
- ежегодный охват мероприятиями академии сотрудников отрасли, школьников и их родителей, учителей, студентов, жителей городов присутствия Росатома составляет 16 млн чел.;
- программа «Профессионалитет», где ведется обучение по 24 профессиям;
- для школьников, ориентированных на карьеру в атомной отрасли, функционирует более 100 специализированных классов.

Достижение стратегических целей Росатома требует максимальной вовлеченности сотрудников во все бизнес-процессы, их стремления развиваться вместе с технологиями и осваивать несколько профессиональных направлений в течение жизни (с учетом скорости меняющихся технологий). Безусловно, важнейшим этапом в подготовке кадров для атомной отрасли являются образовательные организации высшего образования. Консорциум опорных вузов Росатома является интеграционным объединением ведущих университетов страны, осуществляющих подготовку кадров для атомной отрасли. Филиальная сеть НИЯУ МИФИ занимает лидирующую позицию (рис. 2).

¹ Составлено по: Ужакина Ю. Обучение в течение всей жизни – это новая реальность // Вестник Атомпрома. – 2024. – №1. – С. 6-10.

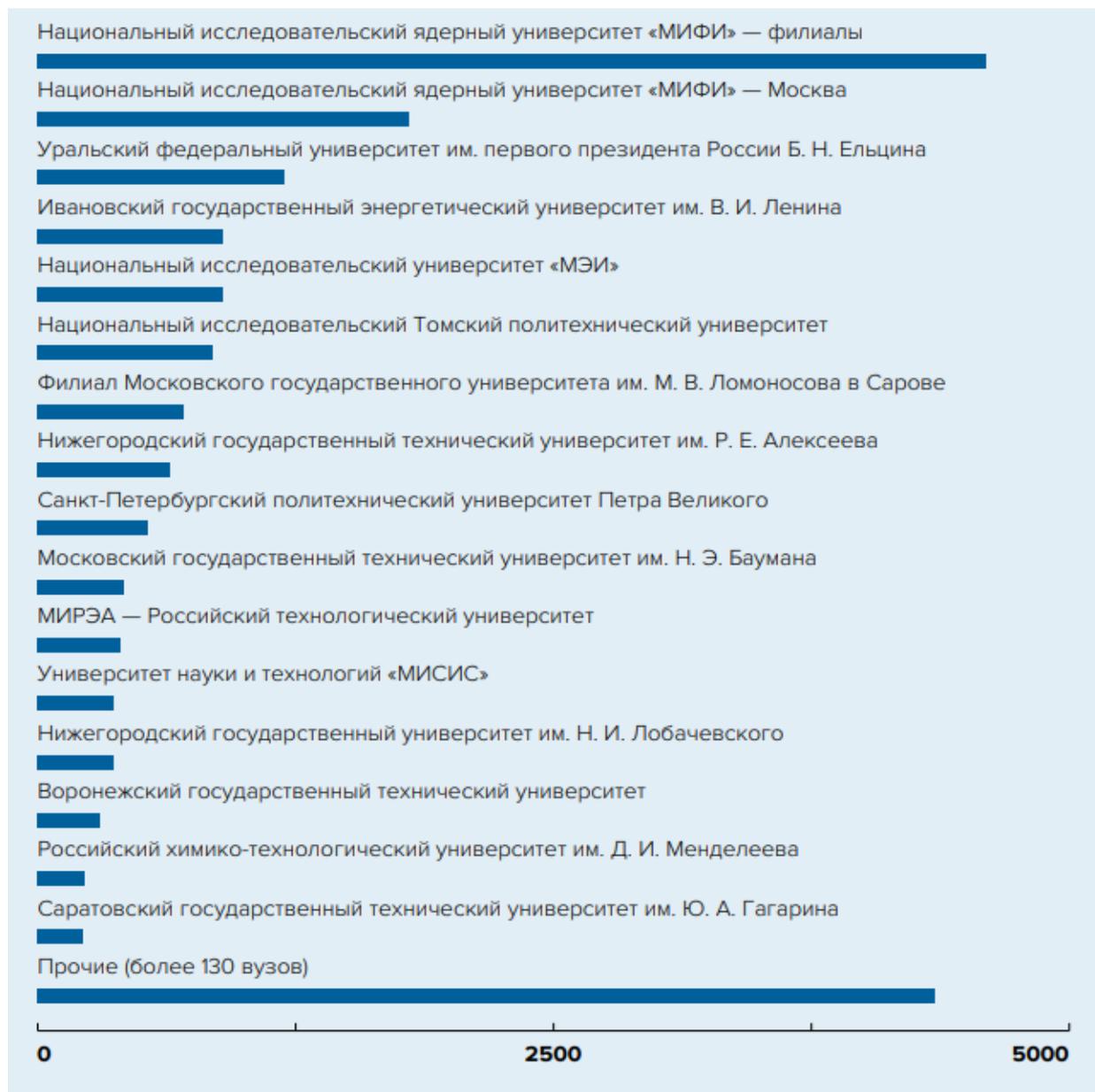


Рисунок 2. *Топ-15 вузов по потребностям Росатома в наборе выпускников в период 2024-2030 гг.*²
Figure 2. *Top 15 universities according to Rosatom's needs in recruiting graduates in the period 2024-2030*²

Рассмотрим реализацию стратегических целей в направлении формирования кадрового потенциала предприятий Росатома на примере предприятий машиностроительного дивизиона, которые обладают стратегическим значением для России, что обуславливает повышенный интерес научного сообщ-

ества к исследованию детерминантов и особенностей их экономического развития и становления, а также определяет актуальность проблемы кадрового обеспечения. В основе эффективности решения данного вопроса лежит тесное сотрудничество предприятий атомного энергетического машино-

² Карезин В. Первый шаг к будущему сотруднику нам нужно делать задолго до его прихода на предприятие // Вестник Атомпрома. – 2024. – №1. – С. 16.

строения с вузами, осуществляющими подготовку специалистов, для решения следующих задач:

- согласование и своевременная корректировка компетентностных моделей выпускников;

- формирование запросов на организацию научно-исследовательской работы научно-педагогических кадров и студентов по актуальным для предприятия темам;

- обеспечение тесной связи теории и практики путем привлечения представителей работодателей к образовательному процессу (чтений лекций, консультации, тьюторская поддержка и проч.);

- создание релевантных институциональных форм взаимодействия с талантливой молодежью – кванториумы, «точки кипения», коворкинги, технопарки и проч.

- организация профессионального развития сотрудников предприятий и преподавателей вузов и обмена прогрессивным опытом при реализации совместных программ и интенсивов по наиболее востребованным направлениям на базе отраслевых центров компетенций;

- ранняя профориентация и профессиональное обучение школьников – будущих студентов технических вузов – в рамках технопарков (например, Атомный технопарк ВИТИ НИЯУ МИФИ, реализующий программы дополнительного довузовского образования), профильных классов (например, атомклассы), предуниверситариев (с углубленным изучением математики, физики и информатики) и даже школ при образовательных организациях высшего образования (например, МБОУ «Инженерно-технологическая гимназия «Юнона» при ВИТИ НИЯУ МИФИ»).

Подобный компетентностный (и коллективный) подход к управлению человеческим потенциалом и образовательной деятельности позволяет обеспечить конкурентоспособность предприятий (и вузов, в том числе) на фоне конъюнктурных колебаний, инновационную активность и прирост итоговых финансово-экономических показателей.

Учитывая роль и значение инновационной активности персонала для развития предприятий и территорий, необходимо максимально эффективно управлять процессом формирования интеллектуального потенциала, ориентируясь на раннее выявление талантов и способностей к инженерному творчеству, инновационному предпринимательству, решению изобретательских задач и проч. Разработка и реализация проектов развития востребованных компетенций может строиться с учетом различных направлений, предполагающих вовлечение разных по возрасту и статусу категорий граждан – это не только сотрудники и студенты образовательных организаций высшего и среднего профессионального образования, но и ветераны производства (пенсионеры), а также дети (школьные и дошкольные образовательные учреждения) (рис. 3).

Определенным преимуществом в достижении указанной цели обладают территории со сформированной устойчивой отраслевой структурой и присутствием образовательных организаций, ведущих подготовку профильных специалистов для промышленных предприятий и организаций. В качестве примера предложим к рассмотрению успешный кейс ВИТИ НИЯУ МИФИ, который может быть использован в качестве объекта бенчмаркинга и тиражирован в других образовательных организациях, выпускающих кадры для инновационно ориентированных предприятий, оказывающих влияние на социально-экономическое развитие территории.

ВИТИ НИЯУ МИФИ – единственный на юге России вуз, осуществляющий подготовку специалистов для атомной отрасли. Он расположен в г. Волгодонске, который по праву называют Атомградом XXI века. Территория интегрирует четыре дивизиона Росатома (электроэнергетический, машиностроительный, инжиниринговый и дивизион по консолидации усилий отрасли в передовых сегментах и технологических платформах электроэнергетики), а также предприятия атомного машиностроительного кластера (рис. 4).

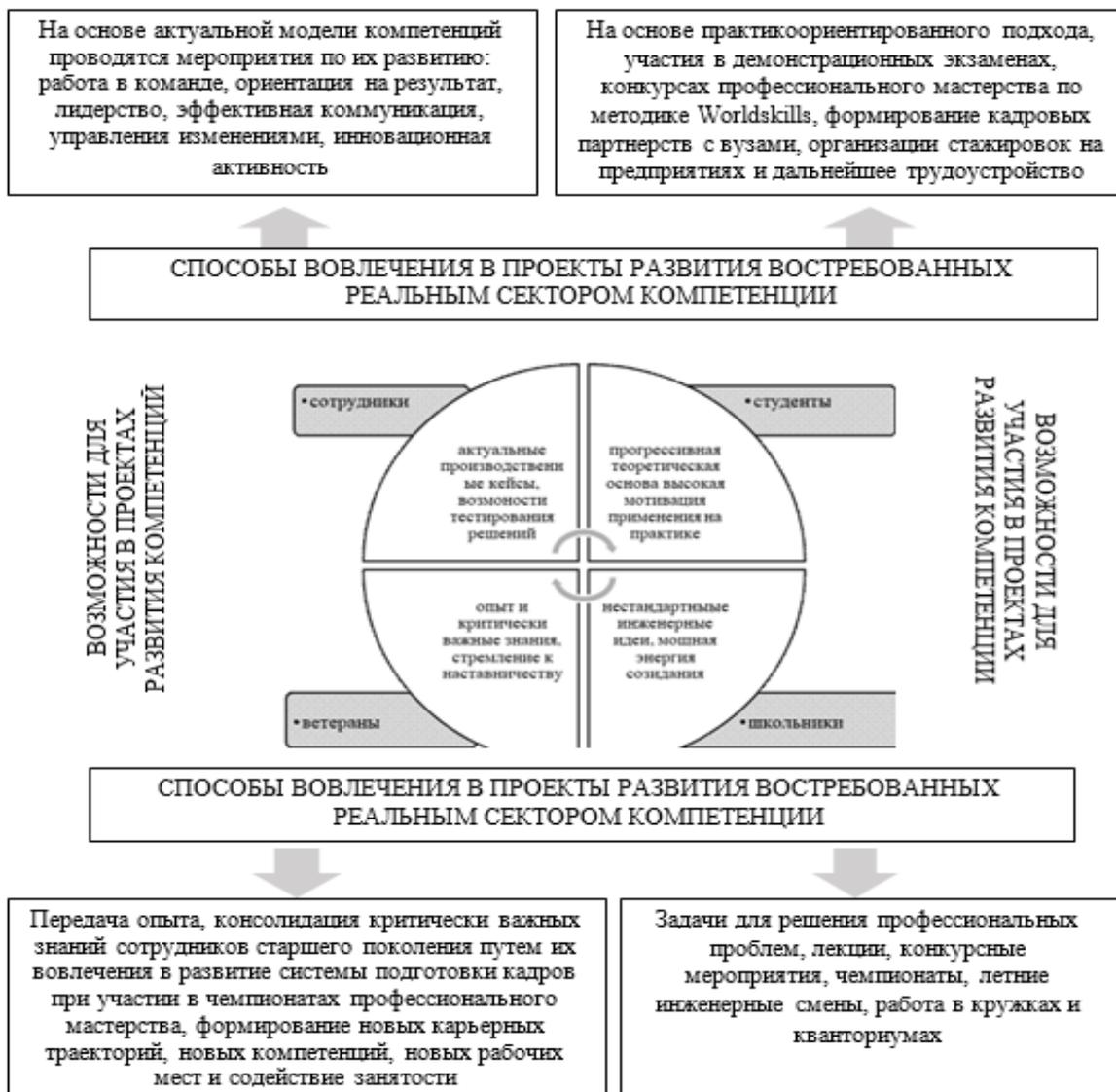


Рисунок 3. Способы и направления вовлечения в проекты развития организаций востребованных компетенций (составлено авторами)

Figure 3. Ways and directions of demanded competency involvement in projects of organisation development (compiled by the authors)

Уникальность расположения, а также наличие в организационной структуре научно-исследовательского подразделения (НИИ АЭМ), придает результатам деятельности ВИТИ НИЯУ МИФИ синергетический эффект, позволяет поддерживать имидж научно-образовательного и ресурсного центра по подготовке эксплуатационного персонала АЭС и кадров для атомного машиностроения и строительства.

ВИТИ НИЯУ МИФИ осуществляет практико-ориентированную подготовку студентов различным образовательным программам высшего и среднего профессионального образования для обеспечения

кадрами полного производственного цикла строительства, проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации оборудования АЭС. География абитуриентов представлена не только прилегающими территориями сельских поселений и малочисленных муниципальных образований, но и крупными городами страны и региона. Также вуз осуществляет практико-ориентированную подготовку иностранных студентов головной площадки (НИЯУ МИФИ) и других филиалов (ИАТЭ) и опорных вузов ГК «Росатом» (ТПУ, СПбПУ, МГСУ, НГТУ) в Ресурсном центре. Обучение ведется на полномасштабном оборудовании и тренаже-

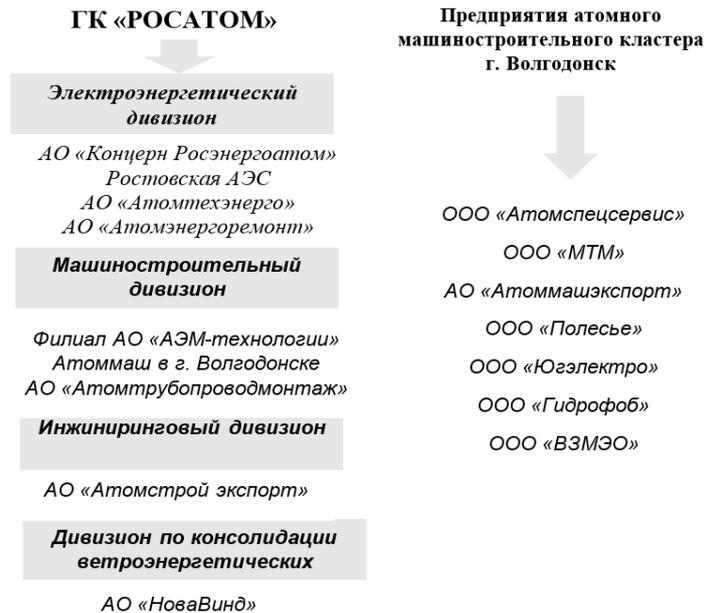


Рисунок 4. *Предприятия-работодатели и промышленные партнеры ВИТИ НИЯУ МИФИ (составлено авторами по источникам [10-12])*

Figure 4. *Employers and industrial partners of VETI NRNU MEPhI (compiled by the authors according to [10-12])*

рах на площадках Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, филиале АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», предприятиях Волгодонского промышленного кластера атомного машиностроения, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий.

Развитие компетенций на всех рассмотренных на рисунке 3 уровнях должно вестись при непосредственном участии предприятий-работодателей и при оказании ими организационной и инфраструктурой поддержки, например, при:

- предоставлении промышленных площадок для организации практических занятий;
- участии ключевых сотрудников в образовательном процессе и в качестве экспертов при проведении демонстрационных экзаменов;
- организации стажировок для научно-педагогических кадров с целью приведения в соответствие теоретических знаний и практических навыков;
- выстраивании эффективных коммуникаций с детьми школьного и дошкольного возраста в рамках экскурсионных программ

для повышения эффективности профориентационной работы.

Достижение тесной интеграции в области формирования кадрового потенциала с предприятиями машиностроительного дивизиона ГК «Росатом» (и обозначенных на рисунке 4 дивизионов), а также другими промышленными партнерами, расположенными на территории региона, позволяет обеспечить консолидацию ключевых ресурсов развития:

- кадровый потенциал;
- полномасштабное оборудование;
- производственные площадки;
- тренажеры отраслевых промышленных предприятий.

Организация дуального обучения специалистов и реализация индивидуальных образовательных траекторий, отвечающих потребностям работодателей, позволяет сократить период адаптации выпускников на рабочем месте, актуализировать формируемые компетенции и обеспечить соответствующую мотивацию и ресурсы для организации исследовательской деятельности. Создание эффективной модели непрерывной подготовки специалистов, включающей в себя среднее профессиональное, высшее и дополнительное профессиональное образо-

вание, позволяет максимально полно учесть весь спектр востребованных компетенций. Для повышения уровня инновационной активности особое значение имеют корпоративные магистерские программы, подготовленные при участии образовательной организации и предприятий – новый интерфейс взаимодействия высокотехнологичного бизнеса и университетов.

При реализации корпоративных магистерских программ сотрудники предприятий могут выступать в качестве экспертов, оказывать тьюторскую поддержку, обеспечивать курирование контента в направлении его актуализации и реалистичности. Обучение должно строиться на основе различных методик:

- омниканальное обучение посредством использования форматов вебинара, видеоконференцсвязи, преимуществ различных мессенджеров;

- «перевернутый класс» как наиболее адекватный современному уровню развития информационного поля формат взаимодействия в рамках аудиторных занятий;

- кастомизированные бизнес-симуляции с использованием промышленного оборудования и/или информационных технологий.

Также следует использовать форматы, при которых, помимо совместных образовательных программ, организуется вовлечение также студентов бакалавриата на вновь открываемые направления подготовки в интересах решения инженерных задач для промышленных партнеров. Так, в частности, одно из предприятий машиностроительного дивизиона – АО «ЦКБМ», формирует производственные задачи как задания в рамках практических занятий студентов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, а научное руководство магистрантами осуществляют сотрудники АО «ЦКБМ».

Представим на рисунке 5 совокупность мероприятий по развитию человеческого потенциала отрасли, рекомендуемых к проведению совместными усилиями образовательной организации и ее промышленных партнеров. Указанные мероприятия предполагают решение различных задач, в частности:

- по направлению развития системы выявления и поддержки талантливой молодежи, профориентации абитуриентов; формирование профессиональных траекторий студентов и молодых специалистов:

- а) комплексное использование традиционных и инновационных технологий профориентационной работы, участие предприятий в организации и проведении олимпиад, конкурсов, чемпионатов среди молодежи с целью раннего выявления талантов;

- б) организация и проведение карьерных мероприятий, тренингов по выявлению и формированию коммуникативных, лидерских качеств, позволяющих развивать переломные компетенции и нетворкинг;

- в) проведение исследований рынка труда и карьерных ожиданий студентов и выпускников, обеспечение трудоустройства молодых специалистов;

- по направлению развития кадрового состава образовательных организаций:

- а) адаптация критериев эффективного контракта под цели и задачи вуза и его промышленных партнеров;

- б) развитие научно-педагогических кадров в направлении актуальных запросов отрасли;

- по направлению создания условий для развития личностного потенциала обучающихся (студентов, сотрудников, школьников):

- а) обеспечение непрерывности образования, включая повышение квалификации;

- б) персонификация образовательных траекторий;

- в) вовлечение экономических стимулов для всех участников образовательного и научно-исследовательского процесса.

Особую роль в развитии кадрового потенциала играет формирование у выпускников навыков проектной работы, поскольку именно в данном формате разрабатываются и реализуются инновационные решения в дивизионах Росатома. Так, в частности, для развития персонала АО «Атомэнергомаш» проводятся форсайт-сессии по генерации бизнес-идей, получающих развитие в преакселераторах в рамках программы развития молодежи STEAM ((science, technology, engineering, math) – программа обучения,

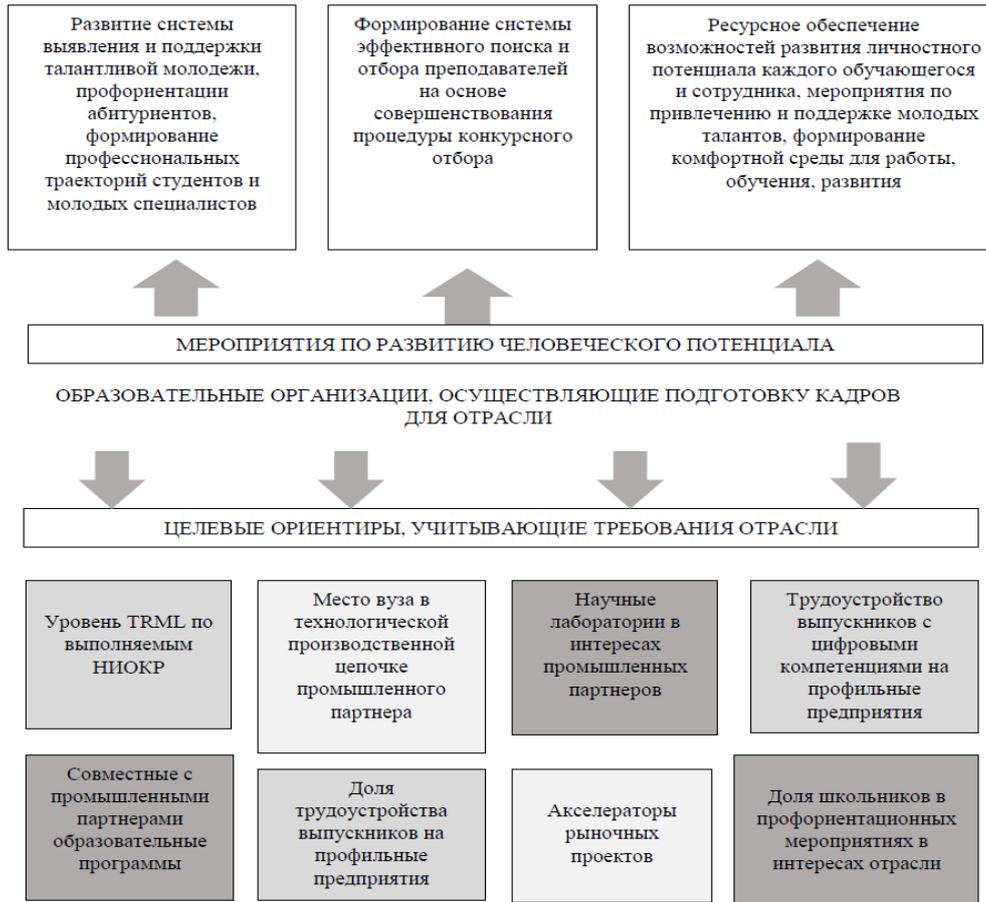


Рисунок 5. Мероприятия и ориентиры образовательной организации в интересах развития человеческого потенциала промышленных партнеров (составлено авторами по источникам [10-12])
Figure 5. Activities and guidelines of the educational organization in the interests of human potential development of industrial partners (compiled by the authors according to [10-12])

сочетающая занятия естественными науками, технологией, инженерией и математикой). Основная цель мероприятия – вовлечение высокопотенциальной молодежи машиностроительного дивизиона в проектную работу по генерации бизнес-идей и новых продуктов с учетом стратегических целей, а также для повышения эффективности деятельности предприятий и дивизиона в целом. Участники должны осуществлять проверку рыночных гипотез по своим продуктам, взаимодействовать с потенциальными клиентами, искать новые направления развития проектов, изучать реальные запросы и новые сегменты рынка. Оценка проектов ведется исходя из рыночных перспектив, наличия или отсутствия конкурентных преимуществ, а также реалистичности планов по реализации. В 2024 г. Атомэнергомаш в сотрудничестве с «Иннохабом Росатома» планирует расширить практику работы с

проектными командами в формате форсайт-сессий и на другие предприятия дивизиона.

Указанные перспективы для молодых специалистов требуют включения и/или развития в учебных планах дисциплин, связанных с формированием навыков организации научно-исследовательской работы и работы в проектных командах. В соответствии с обозначенным мейнстримом, можно предложить образовательным организациям алгоритм работы с обучающимися по программам магистратуры, опирающийся на проблемно-ориентированный подход:

– проведение учебно-методических совещаний на кафедре в конце первого года обучения магистров с целью обсуждения целей и задач исследовательской работы магистров выпускного курса, уточнение тематики и объектов выпускной квалификационной работы (ВКР) в интересах предприятий машиностроительного дивизиона Росатома,

выявление возможностей командной проектной работы при совпадении объектов исследования;

- корректировка структуры рабочих тетрадей для практических занятий, а также их актуализация в случае внесения изменений паспорта компетенций образовательной программы;

- использование бизнес-кейсов предприятий-работодателей для модернизации сценариев практических занятий;

- запись видеолекций в цифровых лабораториях для размещения в электронной информационной образовательной среде (ЭИОС);

- размещение учебно-методических материалов в ЭИОС;

- выдача заданий студентам, общая консультация по организационно-методическим аспектам;

- заполнение рабочих тетрадей в рамках домашнего задания;

- использование специализированных программных продуктов (например, ADVANTA, Альт-Инвест) для формирования прикладных навыков управления проектами;

- создание чата в одобренных мессенджерах учебной дисциплины для оперативного обсуждения вопросов и размещения дополнительных видео-, фото- и аудиоматериалов;

- включение по предварительному согласованию в омниканальные форматы представителей работодателей для обсуждений и консультаций в асинхронном режиме;

- публичное обсуждение выполненных заданий на практических занятиях, корректировка материалов при необходимости;

- оформление результатов научно-исследовательской и проектной работы (научная статья, ВКР, отчет по практике).

Данный алгоритм может стать основой эффективного взаимодействия предприятий с образовательными организациями, одним из решений проблемы кадрового дефицита и актуализации структуры компетенций молодых специалистов, позволяющих обеспечить устойчивый экономический рост предприятий атомного энергетического машиностроения в контексте стратегических ориентиров проектов развития организаций.

Вывод

Подводя итог вышеизложенному, можно отметить значимость взаимодействия образовательных организаций и предприятий в области подготовки кадров, которая проявляется в следующих результатах: повышение качества профессиональной подготовки специалистов, разработка и реализация новых подходов к развитию механизмов рынка труда, эффективная интеграция профессионального образования и производства, активизация инновационной активности вузов и предприятий, формирование многостороннего социального партнёрства образования и бизнеса. Тем не менее, требуется постоянная адаптация и актуализация используемых подходов, методик и практик к меняющимся требованиям внешней среды, вовлечение новейших цифровых решений и перспективный подход к выявлению кадровых потребностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Симонова Г.В., Вихарева Н.А. Повышение эффективности взаимодействия вузов и производственных предприятий при реализации проектного обучения. *Актуальные вопросы образования*. 2021;(2):104–107. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46623687> (дата обращения: 20.04.2024).

Simonova G.V., Vikhareva N.A. Improving the efficiency of interaction between universities and industrial enterprises in the implementation of project-based training. *Current issues of education*. 2021;(2):104–107. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46623687> (accessed: 20.04.2024).

2. Карманова О.В. Направления взаимодействия вузов и промышленных предприятий в эпоху индустрии 4.0. Проблемы практической подготовки студентов: содействие трудоустройству выпускников, проблемы и пути их решения: Сборник докладов XVIII Всероссийской научно-практической

конференции. 01 октября 2021 года. Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2021. С. 82–85. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47294418&pff=1> (дата обращения: 20.04.2024).

Karmanova O.V. Directions of interaction between universities and industrial enterprises in the era of industry 4.0. Problems of practical training of students: assistance in the employment of graduates, problems and ways to solve them: A collection of reports of the XVIII All-Russian Scientific and practical Conference. October 01-2021. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2021. P. 82–85. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47294418&pff=1> (accessed: 20.04.2024).

3. Родригес С.Б., Чигринец Е.Г., Чотчаева С.К. Практическая подготовка студентов инженерных специальностей: опыт взаимодействия вуза и предприятия. Подготовка инженерных кадров: опыт и перспективы. Сборник научных трудов, посвященный 20-летию базовой кафедры «Авиастроение» Донского государственного технического университета. Донской государственный технический университет, 2022; 61–75. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48245028&pff=1> (дата обращения: 18.04.2024)

Rodriguez S.B., Chigrinets E.G., Chotchaeva S.K. Practical training of engineering students: the experience of interaction between a university and an enterprise. Training of engineering personnel: experience and prospects. A collection of scientific papers dedicated to the 20th anniversary of the basic Department of Aircraft Engineering of the Don State Technical University. Don State Technical University, 2022; 61–75. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48245028&pff=1> (accessed: 18.04.2024).

4. Паршина В.С. Управление взаимодействием вузов и предприятий отрасли. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2020;4(48):65–71. Режим доступа: file:///C:/Users/PAKiseleva/Downloads/vestnik_UrGUPS_4_2020.pdf (дата обращения: 23.04.2024).

Parshina V.S. Management of interaction between universities and industry enterprises. *Bulletin of the Ural State University of Railway Engineering*. 2020;4(48):65–71. (In Russ.). Available at: file:///C:/Users/PAKiseleva/Downloads/vestnik_UrGUPS_4_2020.pdf (accessed: 23.04.2024).

5. Флек М.Б., Угнич Е.А. Взаимодействие вуза и предприятия: опыт базовой кафедры в подготовке инженерных кадров. *Университетское управление: практика и анализ*. 2020;24(3):122–136. <https://doi.org/10.15826/umpa.2020.03.030>

Fleck M.B., Ugnich E. A. Interaction of the university and the enterprise: the experience of the basic department in the training of engineering personnel. *University management: practice and analysis*. 2020;24(3):122–136. (In Russ.). <https://doi.org/10.15826/umpa.2020.03.030>

6. Флек М.Б., Угнич Е.А. Развитие форм взаимодействия предприятия с вузом в рамках дуальной модели образования: опыт и перспективы. *Перспективы науки и образования*. 2022;(4/58):671–691. Режим доступа: <https://pnojurnal.wordpress.com/2022/09/05/flek/> (дата обращения: 21.04.2024).

Fleck M.B., Ugnich E.A. Development of forms of interaction between an enterprise and a university within the framework of a dual education model: experience and prospects. *Prospects of science and education*. 2022;(4/58):671–691. (In Russ.). Available at: <https://pnojurnal.wordpress.com/2022/09/05/flek/> (accessed: 21.04.2024).

7. Сулейманкадиева А.Э., Тумарова Т.Г., Добросердова И.И. Сетевое взаимодействие вузов и промышленных предприятий: повышение качества магистерской подготовки. *Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона*. 2018;1:257–258. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ytgllz&ysclid=lw8ztx9euv739612150> (дата обращения: 21.04.2024).

Suleymankadieva A.E., Tumarova T.G., Dobroserdova I.I. Network interaction of universities and industrial enterprises: improving the quality of master's degree training. *Planning and provision of personnel training for the industrial and economic complex of the region*. 2018;1:257–258. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ytgllz&ysclid=lw8ztx9euv739612150> (accessed: 21.04.2024).

8. Кадочигова А.Н., Фурман Н.В. Инновационная деятельность вузов и предприятий: проблемы их взаимодействия. Современные тенденции в науке, технике, образовании: Сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции, Смоленск, 09 декабря 2019 года. Смоленск: Международный научно-информационный центр «Наукофера», 2019. С. 36–38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41489190&pff=1> (дата обращения: 21.04.2024).

Kadochigova A.N., Furman N.V. Innovative activity of universities and enterprises: problems of their interaction. Modern trends in science, technology, and education: A collection of scientific papers based on

the materials of the VII International Scientific and Practical Conference, Smolensk, December 09-2019. Smolensk: International Scientific Information Center «Naukosphere», 2019. P. 36–38. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41489190&pff=1> (accessed: 21.04.2024).

9. Семенко И.Е. Производственная практика как форма сопровождения студентов в процессе профессионального становления в условиях взаимодействия вуз-предприятие. *Московский экономический журнал*. 2020;(2):44. Режим доступа: <https://qje.su/ekonomicheskaya-teoriya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2020-11/> (дата обращения: 22.04.2024).

Semenko I.E. Industrial practice as a form of student support in the process of professional development in the context of university-enterprise interaction. *Moscow economic journal*. 2020;(2):44. (In Russ.). Available at: <https://qje.su/ekonomicheskaya-teoriya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-2-2020-11/> (accessed: 22.04.2024).

10. Головки М.В., Лапкис А.А., Сетраков А.Н. Развитие отраслевых компетенций в вузе как фактор обеспечения безопасности предприятий атомной отрасли. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;42(1):67–74. Режим доступа: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/article/view/108> (дата обращения: 22.04.2024).

Golovko M.V. Lapkis A.A., Setrakov A.N. The development of industry competencies in higher education as a factor in ensuring the safety of nuclear industry enterprises. *Global nuclear safety*. 2022;42(1):67–74. (In Russ.). Available at: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/article/view/108> (accessed: 22.04.2024).

11. Руденко В.А., Головки М.В., Томилин С.А., Цуверкалова О.Ф. Синхронизация задач отраслевых вузов со стратегией развития ГК «Росатом» как фактор обеспечения безопасности атомной энергетики. *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;34(1):98–106. <https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-11>

Rudenko V.A., Golovko M.V., Tomilin S.A., Tsuverkalova O.F. Synchronization of tasks of branch universities with the development strategy of Rosatom State Corporation as a factor in ensuring the safety of nuclear energy. *Global nuclear safety*. 2020;34(1):98–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-11>

12. Головки М.В., Сетраков А.Н., Волгина С.В., Ткачев В.Г. Цифровые тренды в стратегическом развитии предприятий атомного энергетического машиностроения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;46(1):104–115. Режим доступа: <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-09>

Golovko M.V., Setrakov A.N., Volgina S.V., Tkachev V.G. Digital trends in the strategic development of nuclear power engineering enterprises. *Global nuclear safety*. 2023;46(1):104–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-09>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Головки М.В. – концептуализация статьи, предоставление материалов авторских исследований по изучаемой проблеме, анализ современных проблем и успешных практик взаимодействия образовательных организаций и промышленных предприятий, формулирование выводов;

Руденко В.А. – обоснование перехода к новой парадигме партнерства в области формирования и развития кадрового потенциала предприятий атомной отрасли, предоставление уникальных материалов из практики образовательных организаций;

Томилин С.А. – анализ основных направлений стратегического развития Росатома и его машиностроительного дивизиона, исследование проблемы взаимодействия образовательных организаций и промышленных предприятий;

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Golovko M.V. – conceptualization of the article, provision of materials of author's research on the studied problem, analysis of modern problems and successful practices of interaction between educational organizations and industrial enterprises, formulation of conclusions;

Rudenko V.A. – substantiation of the transition to a new paradigm of partnership in the field of formation and development of personnel potential of nuclear industry enterprises, provision of unique materials from the practice of educational organizations;

Tomilin S.A. – analysis of the main directions of strategic development of Rosatom and its engineering division, study of the problem of interaction between educational organizations and industrial enterprises;

Довбыш В.Е. – анализ экспертных оценок и аналитических обзоров специалистов различных дивизионов Росатома, анализ научной литературы по заявленной тематике.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Мария Владимировна Головко, доктор экономических наук, профессор кафедры институциональной экономики и инвестиционного менеджмента, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>

e-mail: golovko178@mail.ru

Валентина Анатольевна Руденко, доктор социологических наук, заведующий кафедрой экономики и социально-гуманитарных дисциплин, руководитель, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

Сергей Алексеевич Томилин, кандидат технических наук, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Виктория Евгеньевна Довбыш, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: VEDovbysh@mephi.ru

Поступила в редакцию 12.04.2024

После доработки 22.07.2024

Принята к публикации 25.07.2024

Dovbysh V.E. – analysis of expert assessments and analytical reviews of specialists from various divisions of Rosatom, analysis of scientific literature on the stated topic.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Maria V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Institutional Economics and Investment Management, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0002-4835-9800>

e-mail: golovko178@mail.ru

Valentina A. Rudenko, Dr. Sci. (Soc.), Head of the Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6698-5469>

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

Sergey A. Tomilin, Cand. Sci. (Engin.), Head of the Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Viktoria E. Dovbish, Ph.D. in Economics, Associate Professor of the Department of Economics and Socio-Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: VEDovbysh@mephi.ru

Received 12.04.2024

Revision 22.07.2024

Accepted 25.07.2024

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 620.9

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-08>

EDN YHGLVS

Оригинальная статья / Original paper



Приоритеты инновационной проектной деятельности
в топливно-энергетическом комплексе России

Н.К. Савельева  , А.А. Созинова , О.В. Фокина 

Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация

 nk_savelyeva@vyatsu.ru

Аннотация. В статье проведен анализ инновационной проектной деятельности в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) Российской Федерации. Целью представленной научно-исследовательской работы является выявление и обоснование уровня и динамики инновационной активности отдельных сфер топливно-энергетического комплекса, включая работу угольных, гидравлических, тепловых и атомных станций. Новизна исследования заключается в выявлении приоритетов инновационной проектной деятельности в ТЭК страны. **Методология и методы.** Для выявления приоритетов инновационной проектной деятельности в топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации применялись общенаучные методы в виде теоретического анализа, аналитического и логического методов, метода сравнения и сопоставления, графического метода. Были использованы научные труды зарубежных и российских ученых по вопросам разработки и реализации инновационных проектов в топливно-энергетическом комплексе, экспертные оценки и аналитические обзоры специалистов в сфере ТЭК, данные федеральной службы государственной статистики. **Результаты.** Проведен анализ затрат на разработку и реализацию инновационных проектов в ТЭК России в разрезе стадий производственно-технологической цепочки и видов энергоносителей. Отмечена роль возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии. Названы передовые производственные технологии, наиболее активно применяемые в топливно-энергетическом комплексе России. Рассмотрен уровень инновационной активности отраслей ТЭК, в том числе в сфере атомной энергетики. Выявлена динамика развития инновационной деятельности в различных сферах ТЭК России за последние годы. Выявлены и обоснованы приоритеты инновационной проектной деятельности в топливно-энергетическом комплексе РФ. Отмечена роль разработки инновационных проектов в сфере ТЭК как стратегического направления развития важнейшей структурной составляющей экономики России. **Обсуждение.** Неравномерность инновационного развития различных сфер топливно-энергетического комплекса РФ обуславливает необходимость выявления и анализа факторов, влияющих на условия разработки и реализации инновационных проектов в ТЭК. Представляет интерес анализ динамики инновационной деятельности за продолжительный период, что позволит выявить определенные закономерности и сформировать четкие предпосылки изменения уровня инновационной активности организаций топливно-энергетического комплекса России. Перспективным направлением являются исследования в области возобновляемой энергетики с учетом передового опыта зарубежных стран. Требуется дальнейшей проработки вопрос стратегического развития инновационного проектирования в сфере топливно-энергетического комплекса Российской Федерации.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс, проектная деятельность, инновации, энергия, ресурсы, уголь, природный газ, электроэнергетика, тепловая энергетика.

Для цитирования: Савельева Н.К., Созинова А.А., Фокина О.В. Приоритеты инновационной проектной деятельности в топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):87–100. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-08>

For citation: Savelieva N.K., Sozinova A.A., Fokina O.V. Priorities of innovative project activities in the Russian fuel and energy sector. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):87–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-08>

Priorities of innovative project activities in the Russian fuel and energy sector

Nadezhda K. Savelieva  , Anastasia A. Sozinova , Olga V. Fokina 

Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation

 nk_savelieva@vyatsu.ru

Abstract. The article analyses innovative project activities in the fuel and energy complex of the Russian Federation. The purpose of the presented research work is to identify and substantiate the level and dynamics of innovative activity in certain areas of the fuel and energy complex, including the operation of coal, hydraulic, thermal and nuclear power plants. The novelty of the research lies in identifying the priorities of innovative project activities in the fuel and energy sector of the country. **Methodology and Methods.** To identify the priorities of innovative project activities in the fuel and energy complex of the Russian Federation, general scientific methods are used in the form of theoretical analysis, analytical and logical methods, the method of comparison and comparison, and the graphical method. The scientific works of foreign and Russian scientists on the development and implementation of innovative projects in the fuel and energy complex, expert assessments and analytical reviews of specialists in the field of fuel and energy, data from the Federal state Statistics Service are used. **Results.** The analysis of costs for the development and implementation of innovative projects in the fuel and energy complex of Russia in the context of the stages of the production and technological chain and energy carriers is carried out. The role of renewable energy sources in the production of electricity is noted. The advanced production technologies that are most actively used in the fuel and energy complex of Russia are named. The level of innovative activity of the Russian fuel and energy industries is considered, including in the field of nuclear energy. The dynamics of the development of innovative activities in various areas of the Russian fuel and energy sector in recent years has been revealed. The priorities of innovative project activities in the fuel and energy complex of the Russian Federation are identified and justified. The role of innovative project activity in the field of fuel and energy sector as a strategic direction for the development of the most important structural component of the Russian economy is noted. **Discussion.** The uneven innovative development of various spheres of the fuel and energy complex of the Russian Federation necessitates the identification and analysis of factors affecting the conditions for the development and implementation of innovative projects in the fuel and energy sector. It is of interest to analyse the dynamics of innovation activity over a longer period, which will allow us to identify certain patterns and form clear prerequisites for changing the level of innovation activity of organizations of the fuel and energy complex of Russia. A promising area is research in the field of renewable energy, taking into account the best practices of foreign countries. The issue of strategic development of innovative design in the field of fuel and energy complex of the Russian Federation requires further study.

Keywords: fuel and energy complex, project activity, innovations, energy, resources, coal, natural gas, electric power, thermal energy.

Введение

Топливо-энергетический комплекс, как важнейшая часть экономического потенциала страны, играет огромную роль в обеспечении деятельности как всех отраслей национальной экономики, формируя значительную долю доходов бюджета РФ и отдельных

регионов, так и населения, удовлетворяя потребности в топливно-энергетических ресурсах. Существующие мировые энергетические тренды и перспективы развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) Российской Федерации, в частности, в сфере возобновляемых источников энергии и

атомной энергетике, определяют необходимость разработки и внедрения инновационных проектов, направленных на укрепление позиций страны в технологическом пространстве, повышение ее конкурентоспособности, создание высокотехнологичных рабочих мест, формирование эффективной трудовой занятости в будущем. Разработка инновационных проектов позволит сократить значительную долю заимствований зарубежных высоких технологий, снизить зависимость от поставок программных средств, расходных материалов и прочих ресурсов, а применение проектно-ориентированного подхода поможет устранить существующие технико-экономические проблемы в топливно-энергетическом комплексе РФ в виде отставания от мирового уровня развития техники и технологий, истощения минерально-сырьевой базы, низкой инвестиционной привлекательности отдельных отраслей.

Методология и методы

Для исследования приоритетов инновационной проектной деятельности в топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации применялись общенаучные методы в виде теоретического анализа, аналитического и логического методов, метода сравнения и сопоставления, графического метода.

Анализ научной литературы по заявленной тематике показал высокую степень заинтересованности зарубежных и российских ученых в вопросах разработки и реализации инновационных проектов в топливно-энергетическом комплексе. Анализ эффективности, стабильности и оценки инновационных проектов в области энергетики проведен в работах А.В. Ломазова и др. [1], О.Т. Джоела и В.У. Огуаноби [2], Б. Ан-Нуари и др. [3] и других авторов [4, 5, 6]. Отмечен рост спроса на инновационные проекты в области энергетики. Проведена оценка влияния прорывных технологий на эффективность энергетических проектов, в том числе в атомной энергетике, предложен интеллектуальный инструментарий для классификации инновационных проектов, позволяющий снизить трудоемкость сравни-

тельного анализа эффективности проектов, систематизированы факторы, влияющие на особенности проектов, проведена их экспертная оценка.

Международный опыт интеграции проектов в сфере инфраструктуры топливно-энергетического комплекса освещен в работах А.И. Никифорова и др. [7], Г.О. Дарамора и др. [8], Ч. Ньек-Эзи [9] и других авторов [10, 11, 12]. Указано, что энергетические проекты и устойчивая инфраструктура являются важными катализаторами, которые могут повысить экономическую стабильность и энергетическую безопасность, снизить риски, связанные с дефицитом энергии, способствовать развитию экономики. Говорится о необходимости обеспечения бесперебойной и безаварийной работы объектов международной энергетической инфраструктуры. Отмечена тенденция к многоцелевому использованию объектов энергетического сектора, таких как ветряные электростанции, нефтяные платформы, волновые турбины, атомные электростанции и пр., названы особенности интеграции аквакультуры в топливно-энергетические объекты, приведены примеры реализации проектов гибридных систем, использования оборотной воды водохранилищ гидроэлектростанций и тепловых электростанций, разработки интегрированной плавучей системы, включающей солнечные батареи. Дан обзор коммуникационных барьеров в международных энергетических проектах. Обоснована взаимосвязь между материализацией и воспроизводством инфраструктуры в крупномасштабных проектах с социально-экономическим развитием. Отмечено, что реализация проектов по использованию объектов инфраструктуры топливно-энергетической отрасли позволяет значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду. Значительная часть публикаций посвящена инновационным проектам в сфере возобновляемых источников энергии.

Вопросы инвестирования средств в разработку и реализацию инновационных проектов в сфере топливно-энергетического комплекса рассмотрены М.Г. Салько и др. [13], Е. Гетачевым и др. [14], Г. Мохандасом [15]

и в публикациях других авторов [16, 17]. В работах систематизирована процедура оценки инвестиционных проектов, рассмотрены различные методы преобразования и агрегирования показателей, сформирована база показателей. Отмечено, что программы устойчивого финансирования необходимы для продвижения и поддержки проектов в области различных источников энергии с долгосрочным и краткосрочным экономическим ростом. Указано, что одной из целей инвестирования проектов в сфере энергетики является снижение рисков и обеспечение их прибыльности. Вместе с тем, авторы утверждают, что существует опасность растраты капитала, выделенного на разработку и реализацию инновационных проектов в сфере энергетики, и оценивают причины такого явления. Произведена комплексная оценка финансовых факторов, влияющих на доступ к капиталу в энергетических отраслях. Указано, что в настоящее время многие, особенно промышленные организации, деятельность которых связана с рисками для здоровья человека и окружающей среды, видят свою ответственность в поддержании стабильности развития топливно-энергетического комплекса государства. Следствием такой политики становится разработка проектов по реализации социальных программ.

Вместе с тем, анализ источников показал недостаточное раскрытие вопросов, ориентированных на изучение структуры инновационных проектов, внедряемых в различные сферы топливно-энергетического комплекса и причины неравномерности инновационного развития указанных сфер.

Результаты и обсуждения

Все чаще на предприятиях топливно-энергетического комплекса, наряду с реализацией технологических и деловых процессов, наблюдается внедрение проектно-ориентированного подхода. Проектная форма применяется на любой стадии существования энергетических объектов (инвестиционная стадия, стадии эксплуатации и ликвидации), любой сфере их деятельности (добыча, производство, передача и распределение) и относительно

любого вида энергоносителя (нефть, газ, кокс, водород и пр.).

Анализ затрат на разработку и реализацию инновационных проектов в привязке к стадиям производственно-технологического процесса позволил выявить, что в сфере добычи топливно-энергетических ресурсов особое внимание было уделено сегменту добычи природного газа. Доля затрат на инновации в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг в период 2020-2021 гг. составляла 3,45% и 3,32% соответственно; в 2022 г. наблюдается резкое падение показателя, связанное с изменением геополитической обстановки (табл. 1).

В сфере производства наибольший удельный вес затрат наблюдается в производстве жидкого топлива; в сфере передачи и распределения – в распределении электроэнергии. Наблюдаемая картина в первую очередь объясняется стремлением участников рынка получить большую отдачу от инвестирования средств в разработку и внедрение инноваций в наиболее прибыльные виды деятельности. Так, известно, что добыча газа характеризуется наибольшим показателем материалоотдачи, то есть наименьшими потребностями в материальных ресурсах; наблюдается наибольшая платежеспособность оборотных активов, наименьший коэффициент леввериджа, высокая доходность затрат и показателей рентабельности, что определяет устойчивое финансовое положение предприятий в данной сфере. В сегменте производства жидкого топлива во всем мире прослеживается тенденция к росту объемов производства. Основными факторами являются рост внутреннего спроса и высокие цены на экспорт. При этом рентабельность процессов может достигать более двух тысяч процентов в зависимости от природы исходного сырья [18]. Привлекательность сегмента распределения электроэнергии обусловлена его относительной стабильностью и защищенностью во время кризисных явлений на финансовых рынках и в экономике. Даже в кризисные годы потребление энергии падает не более, чем на 2-3% и восстанавливается за 1-2 года. Сектор является дивидендным и относительно защищенным от инфляции, поскольку тарифы, как правило, индексируют в пределах инфляции или выше ее значений.

Таблица 1. Удельный вес затрат на разработку и реализацию инновационных проектов в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг, в процентах (составлено авторами по источнику: <https://fedstat.ru/indicator/60022>)

Table 1. The share of costs for the development and implementation of innovative projects in the total volume of goods shipped, works performed, services, as a percentage (compiled by the authors according to <https://fedstat.ru/indicator/60022>)

Сфера ТЭК	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год
Добыча ресурсов				
Добыча угля и антрацита	н/д	0,17	0,04	0,05
Добыча нефти	1,0	0,43	0,38	0,9
Добыча природного газа	0,1	3,45	3,32	0,08
Производство ресурсов				
Производство кокса	1,2	0	0,02	0
Производство жидкого топлива	2,4	3,49	2,46	2,06
Производство электроэнергии	1,3	1,45	0,28	0,76
в т.ч. атомными электростанциями	0,2	0,04	0,03	1,08
Производство и распределение газообразного топлива	н/д	0,85	0,07	0,09
Производство пара и горячей воды (тепловой энергии)	0,2	0,69	0,13	0,45
Передача и распределение ресурсов				
Передача электроэнергии	0,9	1,16	1,52	1,17
Распределение электроэнергии	1,1	3,23	3,65	3,2
Передача пара и горячей воды (тепловой энергии)	0,2	0,27	0,15	0,07
Распределение пара и горячей воды (тепловой энергии)	н/д	0,72	0,18	0,34

Активное развитие инновационная проектная деятельность получила в сфере производства электроэнергии на базе атомных электростанций. Если в 2019 г. удельный вес затрат на инновационную деятельность в данной сфере составлял 0,2 %, то в 2022 г. уже 1,08 %.

Помимо показателей прибыльности и устойчивости определенное влияние на инновационную активность компаний также оказывают факторы спроса в отрасли. При этом наибольшая величина вложений практически по всем рассматриваемым направлениям наблюдается в период 2020 и 2021 годов, что объясняется необходимостью восстановления и выведения отрасли из пандемийного кризиса, сопровождавшегося снижением спроса на все основные виды энергоресурсов.

В период 2019-2020 гг. наблюдается активное инвестирование средств на разработку инновационных проектов в производство электроэнергии, получаемой из возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – рисунок 1. Если по прочим производствам удельный вес инноваций колеблется от 0,02 до 0,43, то по возобновляемым исто-

чникам энергии, включая выработанную солнечными, ветровыми и геотермальными электростанциями, доля затрат на разработку и реализацию инновационных проектов составляет 50,6 % и 35,61 % в 2019 и 2020 гг. соответственно. Такие цифры свидетельствуют о повышенном внимании к вопросу «энергетической трансформации», предполагающей быстрое распространение и повышение роли ВИЭ в энергосистеме страны в соответствии с общемировыми тенденциями и изменение структуры производства электроэнергии и энергетических технологий. Возобновляемые источники энергии обладают несомненными преимуществами перед традиционными источниками, а именно:

- экологической безопасностью, заключающейся в уменьшении загрязнения воздуха и выбросов парниковых газов, сокращении потребления природных ресурсов, отсутствии радиоактивных и других опасных отходов;

- экономическими преимуществами в виде создания новых рабочих мест в секторах производства, снижения зависимости от поставок энергии, установки и обслужи-

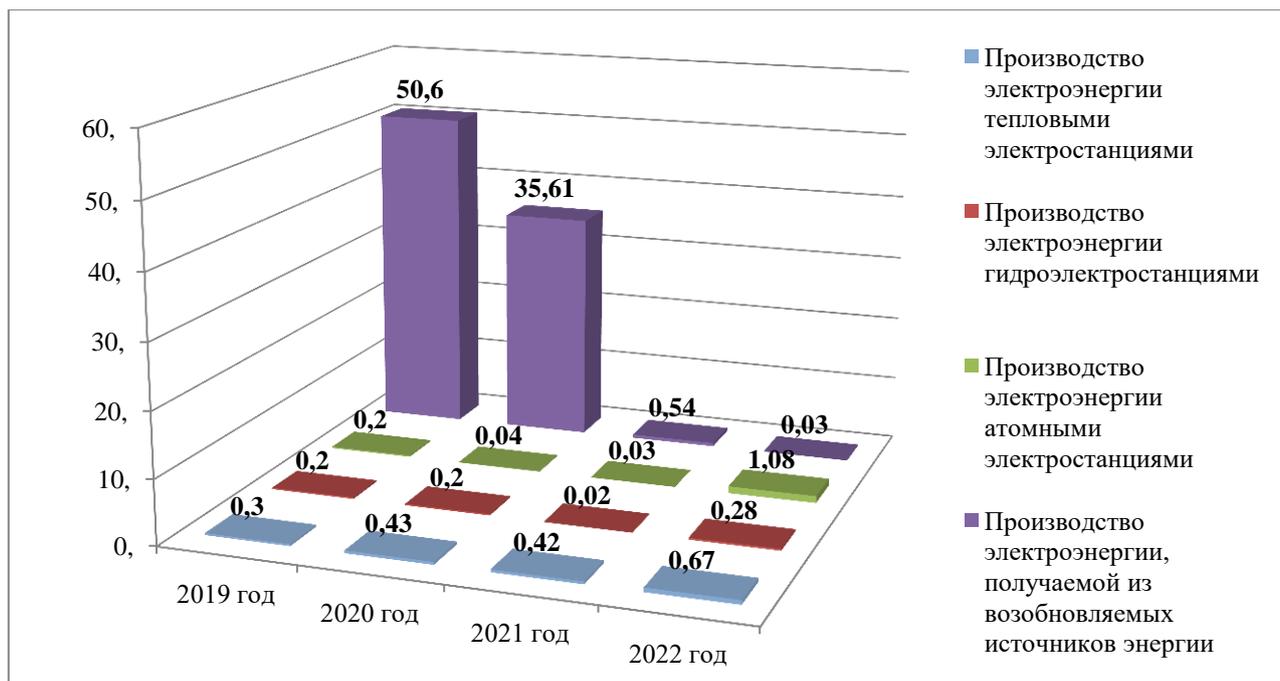


Рисунок 1. Удельный вес затрат на разработку и реализацию инновационных проектов в сегменте производства электроэнергии в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг, в процентах (составлено авторами по источнику: <https://fedstat.ru/indicator/60022>)

Figure 1. The share of costs for the development and implementation of innovative projects in the segment of electricity generation in the total volume of goods shipped, works performed, services, as a percentage (compiled by the authors according to <https://fedstat.ru/indicator/60022>)

вания систем возобновляемой энергии, снижения затрат на производство энергии вследствие все большей доступности и экономической выгоды;

- стимулированием развития новых технологий, что, в свою очередь стимулирует экономический рост и способствует созданию новых рабочих мест;

- наличием устойчивых и стабильных поставок энергии.

С 2013 г. в России действует государственная программа возобновляемой энергетики (ДПМ ВИЭ 1.0) с целью обеспечения экономической целесообразности возведения ветровых, солнечных и малых гидроэлектростанций. В настоящее время в стране в общем объеме валового потенциала ВИЭ, то есть количестве энергии, заключенном в данном виде энергоресурса, при условии ее полного полезного использования, доля солнечной энергии составляет 71,3 %, энергии ветра – 28,7 %, энергии биомассы – 0,02 %, энергии малых рек – 0,01 %, энергии вторичных низкопотенциальных источников тепла – 0,02 % [19, с. 37]. Несмотря на то, что программа действует до 2024 г., в 2020 г.

отбор проектов в рамках программы завершился, что обусловило падение объемов затрат на разработку и внедрение проектов в данной сфере до 0,54 % в 2021 г. и 0,03% в 2022 г. Помимо этого, снижение доли затрат обусловлено целым рядом объективных и субъективных факторов, таких как невысокая экономическая конкурентоспособность ВИЭ по отношению к топливной энергетике, когда цены и тарифы на тепловую и электрическую энергию в районах централизованного энергоснабжения России существенно ниже, чем в других странах; огромные запасы топливно-энергетических ресурсов наряду с большим резервом мощности объединенных энергосистем при низких темпах роста электропотребления; централизованная система доставки тепла, электроэнергии и топлива; более высокая эффективность традиционных источников энергии по показателям «затраты-результат»; необходимость реализации мер государственной экономической поддержки и пр. Запуск второго этапа поддержки ВИЭ в России, известного как программа ДПМ

ВИЭ 2.0, предусматривается на период 2025-2035 годов.

Другим перспективным направлением в сфере ТЭК России является атомная энергетика как современная экологичная, высокотехнологичная и безопасная, отрасль, где внедряются самые передовые технологии. Доля АЭС в выработке электроэнергии в России превышает 20 % и достигает 40 % в европейской части страны. Как показали результаты исследований, атомная энергетика по уровню воздействия на окружающую среду по параметрам выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, материалоемко-

сти, влиянию на здоровье и продолжительность жизни человека сопоставима с другими традиционно «зелеными» видами электроэнергетики. Признание атомной энергетики в составе низкоуглеродных «зеленых» и устойчивых видов генерации на уровне законодательства является важнейшим этапом реализации стратегии устойчивого развития. Отдельные показатели инновационной проектной активности предприятий, занимающихся производством электроэнергии на базе атомных электростанций, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Отдельные показатели развития инновационной деятельности в сфере производства электроэнергии атомными станциями (составлено авторами по ЕМИСС по источнику: <https://www.fedstat.ru/organizations/>)

Table 2. Selected indicators of the development of innovative activities in the field of power generation by nuclear power plants (compiled by the authors according to <https://www.fedstat.ru/organizations/>)

Показатель	2017 год	2018 год	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год	Изменение
Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами (млрд. руб.)	395,29	420,05	979,53	497,54	555,32	1 088,7	275,41 (процент)
Отгружено инновационных товаров, работ, услуг, созданных с использованием результатов интеллектуальной деятельности, права на которые принадлежат российским правообладателям (млрд. руб.)	н/д	н/д	103,27	н/д	н/д	199,7	н/д
Удельный вес затрат на инновационную деятельность в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг (процент)	н/д	н/д	0,2	0,04	0,03	1,08	+0,88 п.п.
Доля электроэнергии, произведенной атомными электростанциями, в общем объеме произведенной электроэнергии (процент)	20,29	19,79	34,43	20,19	22,83	33,63	+13,34

За период 2017-2022 гг. объемы производства электроэнергии на базе атомных станций выросли в 2,75 раза. Доля производства в общем объеме произведенной электроэнергии в 2022 г. составила 33,63 %, а удельный вес затрат на инновационную деятельность достиг 1,08 %. Выросли объемы интеллектуальной деятельности, права на которую принадлежат российским правообладателям – с 103,27 млрд. руб. в 2019 г. до 199,7 млрд. руб. в 2022 году. Заметное

падение объемов инновационной деятельности в 2020 г. обусловлено пандемийной ситуацией, повлиявшей на все сферы российской экономики, в том числе и на атомную энергетику. Тем не менее, начиная с 2021 г., наблюдается выравнивание показателей и приближение, а иногда и опережение, величины показателей допандемийного 2019 года.

Будущее атомной энергетики связано с такими инновационными направлениями,

как развитие водородной энергетики, развитие двухкомпонентной ядерной энергетики с замкнутым топливным циклом и на коммерческой основе массовое производство атомных станций малой мощности для энергоснабжения удаленных регионов.

В разрезе видов энергоресурсов наибольшее количество инновационных проектов реализуется в электроэнергетической отрасли

с увеличением доли проектов с 40,5% в 2020 г. до 44,1% в 2022 г. – рисунок 2. На втором и третьем местах стоят тепловая (от 20,5% до 22,6%) и газовая (от 18,6% до 21,2%) энергетика. Удельный вес проектов в нефтяной сфере колеблется от 11,8% до 13,1%. Менее всего реализуется инновационных проектов в сфере твердого топлива – 3,3% в 2022 году.

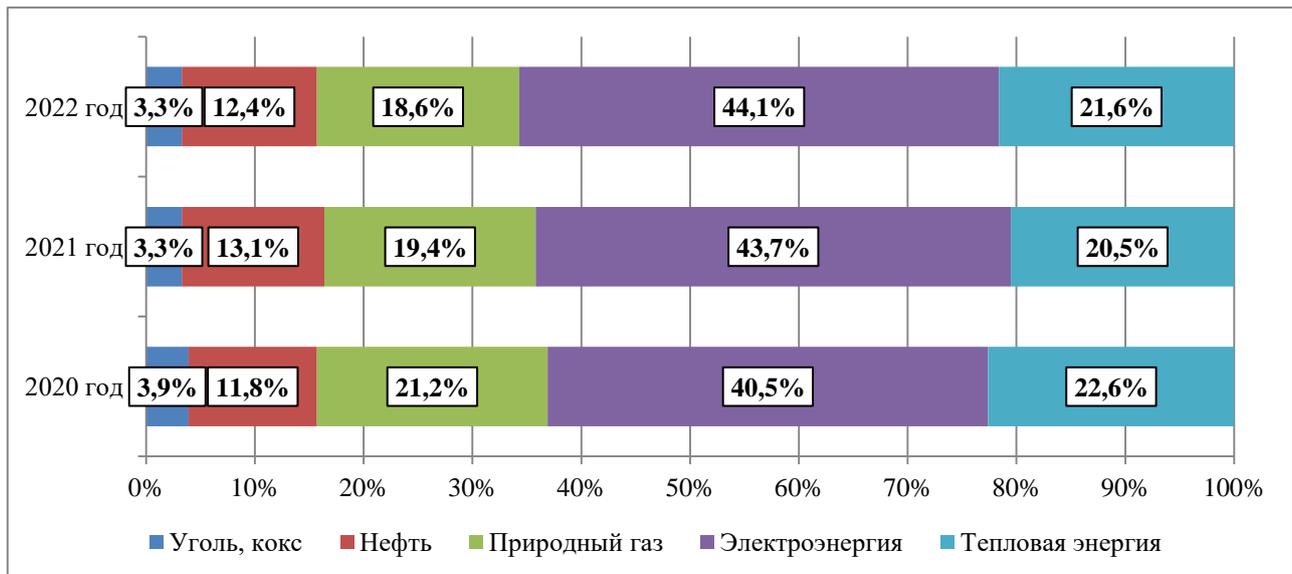


Рисунок 2. Доля реализуемых инновационных проектов в общем числе реализуемых проектов по всем видам энергоресурсов (составлено авторами по источнику: <https://www.fedstat.ru/indicator/58662>)

Figure 2. The share of implemented innovative projects in the total number of implemented projects for all types of energy resources (compiled by the authors according to <https://www.fedstat.ru/indicator/58662>)

Инновационное развитие является основой решения стратегических задач, стоящих перед топливно-энергетическим комплексом России, что дает импульс для ведения планомерной политики по стимулированию разработки и внедрения в ТЭК новейших технологий и материалов. Основными направлениями в научно-технической сфере являются разработка новых методов добычи, оптимизация процесса управления за счет применения информационных технологий и развитие возобновляемых источников энергии. В организационной сфере проектная деятельность ведется для разработки специальных процедур управления инновациями, сотрудничества с компаниями ТЭК, научно-исследовательскими организациями, проведения совместных исследований и разработок, использования мер государственной поддержки.

Самое большое количество используемых инновационных производственных технологий наблюдалось в 2019 г. – 79184 единицы. В 2022 г. количество технологий составило 74209 единиц или 103,3% по сравнению с 2017 годом. В качестве наиболее востребованных в 2022 г. следует отметить технологии:

- связь, управление и геоинформатика – 14370 проекта;
- межфирменные компьютерные сети, включая экстранет и электронный обмен данными – 3520 проектов;
- производственная информационная система и автоматизация управления производством – 3484 проекта;
- глобальные системы навигации, такие как ГЛОНАСС, GPS и др. – 3347 проектов;

– технологии автоматизированной идентификации, наблюдения и/или контроля – 3003 проекта;

– технологии беспроводной связи для производства – 2746 проектов;

– удаленные сенсоры, передающие данные беспроводным образом/по сети Интернет – 2060 проектов;

мобильные устройства с возможностью геолокации – 1757 проектов;

– сети датчиков, промышленный интернет вещей – 1363 проекта;

– автоматизированные системы контроля, например, на основе зрения, лазерных, рентгеновских, камер высокой четкости (HD) или сенсоров – 1278 проектов;

– передовые методы организации и управления производством – 1234 проекта;

– технологии промышленных вычислений и больших данных – 1048 проекта и другие (см. <https://www.fedstat.ru/indicator/58662>).

В сфере атомной энергетики в 2022 г. было реализовано 322 инновационных проекта. Наиболее востребованными передовыми технологиями являются:

– производство, обработка, транспортировка и сборка – 72 проекта;

– производственная информационная система и автоматизация управления производством – 58 проектов;

– гибкие производственные ячейки (FMC) или гибкие производственные системы (FMS) – 55 проектов;

– связь, управление и геоинформатика – 50 проектов;

– передовые методы организации и управления производством – 45 проектов;

– система управления производством (MES) – 31 проект;

– технологии автоматизированной идентификации, наблюдения и/или контроля – 31 проект;

– межфирменные компьютерные сети, включая экстранет и электронный обмен данными (EDI) – 29 проектов;

– проектирование и инжиниринг – 27 проектов;

– технологии промышленных вычислений и больших данных – 25 проектов (см. <https://www.fedstat.ru/indicator/58662>).

Реализация указанных и других инновационных технологий определила уровень инновационной активности сфер ТЭК России, измеряемый через удельный вес организаций, участвующих в реализации инновационных проектов (табл. 3).

За период 2019-2022 гг. наибольший удельный вес организаций, участвующих в инновационной деятельности, наблюдается в сфере производства кокса (от 50,0 % до 71,43 %); почти половина предприятий, использующих инновационные технологии, работает в сфере производства жидкого топлива (от 41,18 % до 50,0 %). Также следует отметить организации в сфере добычи природного газа, производства электроэнергии атомными электростанциями и распределения природного газа.

Если рассматривать динамику веса организаций, реализующих инновационные проекты, то наиболее активно развивающимися сферами являются распределение газообразного топлива (+3,2 %) и распределение природного, сухого газа (+2,4 п.п.). Скорее всего, такая тенденция обусловлена реализацией одного из наиболее масштабных и значимых направлений работы «Газпрома» на внутреннем рынке по газификации территории России. В программе участвуют 72 региона РФ, предполагается провести более 24 тыс. километров новых газопроводов, провести газификацию более 538 тыс. домовладений и квартир и более 3 тыс. котельных и промышленных предприятий. Объем инвестиций составляет более 526 млрд. рублей. В сфере атомной энергетики наибольший удельный вес предприятий наблюдался в 2017 г. (30,3 %). Последующий рост произошел в постпандемный период, где в 2022 г. доля предприятий достигла 22,22 % с увеличением в 5,2 п.п. по сравнению с 2020 годом.

Наибольшее падение наблюдается среди организаций, занимающихся технологическим присоединением к распределительным электросетям (-11,48 п.п.) и добычей природного газа (-10,62 п.п.).

Таблица 3. Доля организаций, осуществлявших реализацию инновационных проектов, к общему числу обследованных организаций, в процентах (составлено авторами по источнику: <https://fedstat.ru/indicator/58769>)

Table 3. The percentage of organizations that implemented innovative projects to the total number of surveyed organizations, as a percentage (compiled by the authors according to <https://fedstat.ru/indicator/58769>)

Сфера ТЭК	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год	Изменение, ±
1. Добыча угля и антрацита	4,60	5,00	5,50	5,13	+0,53
2. Добыча нефти и природного газа	12,40	12,11	14,98	12,50	+0,10
- добыча нефти	13,00	12,59	16,44	13,59	+0,59
- добыча природного газа	26,80	25,49	24,07	16,18	-10,62
3. Производство кокса	57,10	71,43	50,00	50,00	-7,10
4. Производство жидкого топлива	50,00	47,37	46,30	41,18	-8,82
5. Производство, передача и распределение электроэнергии, в т.ч.	н/д	12,83	13,13	10,95	-1,88*
5.1. Производство электроэнергии	13,50	13,28	13,20	10,89	-2,61
- тепловыми электростанциями	17,30	16,74	17,20	12,97	-4,33
- гидроэлектростанциями	4,70	5,56	5,41	5,00	+0,30
- атомными электростанциями	26,20	17,02	22,45	22,22	-3,98
- получаемой из возобновляемых источников энергии	5,30	6,25	4,39	4,85	-0,45
5.2. Передача электроэнергии и технологическое присоединение к распределительным электросетям	12,50	13,49	14,49	12,07	-0,43
- передача электроэнергии	12,20	15,09	15,26	12,50	+0,30
- технологическое присоединение к распределительным электросетям	30,00	11,90	18,60	18,52	-11,48
5.3. Распределение электроэнергии	5,50	8,16	6,32	5,65	+0,15
6. Производство и распределение газообразного топлива	н/д	н/д	12,12	11,52	-0,60**
- распределение газообразного топлива	8,50	14,02	12,44	11,70	+3,20
- распределение природного, сухого (отбензинного) газа	17,60	20,83	22,22	20,00	+2,40
7. Производство, передача и распределение пара и горячей воды (тепловой энергии); кондиционирование воздуха, в т.ч.	5,90	7,56	5,82	5,71	-0,19
7.1. Производство пара и горячей воды:	5,20	7,44	5,26	5,62	+0,42
- тепловыми электростанциями	11,10	15,29	8,70	12,37	+1,27
- котельными	4,90	6,94	5,20	5,13	+0,23
7.2. Передача пара и горячей воды	7,30	9,29	9,59	6,76	-0,54
7.3. Распределение пара и горячей воды	3,70	6,32	8,29	4,07	+0,37

Примечание: * к 2020 г.

** к 2021 г.

В первом случае это, как предполагается, связано с введением в 2020 г. новых правил при определении стоимости технологического присоединения, когда приказом Федеральной антимонопольной службы в тариф стали дополнительно закладываться расходы

на обеспечение объектов электросетевого хозяйства средствами коммерческого учета электрической энергии. Также взамен регионального определения ставок оплаты на уровне субъектов РФ были установлены перечни стандартизированных тарифных ста-

вок¹, что привело к дополнительным затратам и снижению прибыльности предприятий. Определенное влияние оказало постепенное насыщение рынка услугами, обусловленное отсутствием повторного спроса, а также отмена в 2022 г. льготной ставки на осуществление техприсоединения физических и юридических лиц к электросетям. Снижение инновационной активности в сфере добычи природного газа связано с падением ключевых показателей (выручка, чистая прибыль, добыча, экспорт) ПАО «Газпром». Падение объемов экспорта объясняется принятием «политически мотивированных решений» в ряде стран, направленных на отказ от импорта российского газа и потерей премиального европейского рынка. Падение на внутреннем рынке компания объясняет «несколько более мягкими температурными режимами как в зимнее, так и в весенне-летнее время»².

Темпы изменения доли предприятий прочих сфер топливно-энергетического комплекса находятся в пределах от -8,82 (производство жидкого топлива) до +1,27 (производство пара и горячей воды тепловыми электростанциями).

Современный этап инновационного развития топливно-энергетической отрасли РФ характеризуется активизацией процессов импортозамещения и реализацией проектов по внедрению технологий инновационного типа по увеличению нефтеотдачи, повышению интенсификации добычи нефти и газа, повышению энергетической эффективности

¹ Приказ от 24 июля 2020 года № 560/20 «О внесении изменений в Методические указания по определению размера платы за технологическое присоединение к электрическим сетям, утвержденные приказом Федеральной антимонопольной службы от 29 августа 2017 г. № 1135/17: Гарант.ру. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74324349/> (дата доступа: 30.05.2024).

² Потеряли четверть: за сокращение добычи и экспорта «Газпрома» заплатят россияне: Новые известия. URL: <https://newizv.ru/news/2023-09-29/poteryali-chetvert-za-sokraschenie-dobychi-i-eksporta-gazproma-zaplatyat-rossiyane-420434> (дата обращения: 06.03.2024).

используемого оборудования, снижению углеродного следа, цифровизации энергетики, разработке водородной энергетики. Особое внимание уделяется выявлению и изучению барьеров, препятствующих инновационному развитию комплекса (отсутствие запчастей, сложности в обслуживании зарубежного оборудования, разрывы цепочек поставок и пр.), разработке мер по нивелированию проблем, разработке универсальных и адаптивных моделей по внедрению инновационного опыта. Инновационная проектная деятельность в сфере ТЭК является не столько совокупностью тактических решений, принимаемых на уровне предприятий-участников, сколько стратегическим направлением развития важнейшей структурной составляющей экономики России, ориентированным на оптимизацию процессов добычи, переработки и распределения энергии, минимизацию производственных издержек, снижение энергопотерь, повышение энергоотдачи, рост прибыли и, в целом, на повышение конкурентоспособности государства.

Вывод

Анализ инновационной проектной деятельности в сфере топливно-энергетического комплекса позволяет сделать вывод о неравномерности инновационной активности различных сфер ТЭК.

В разрезе стадий производственно-технологического процесса особое внимание к разработке и внедрению инновационных проектов уделено сегменту добычи природного газа, хотя в 2022 г. наблюдается резкое снижение удельного веса затрат на инновационную деятельность, связанное с изменением геополитической обстановки. В сфере производства наибольший удельный вес затрат наблюдается в сегменте жидкого топлива, в сфере передачи и распределения – в сегменте электроэнергии. Наблюдаемая картина в первую очередь объясняется стремлением участников рынка получить большую отдачу от инвестирования средств в разработку и внедрение инноваций в наиболее прибыльные виды деятельности.

До 2020 г. наблюдалось активное инвестирование средств в разработку инновационных проектов по производству электро-

энергии, получаемой из возобновляемых источников энергии. Завершение отбора проектов в 2020 г. в рамках программы ДПМ ВИЭ 1.0 повлекло падение объемов затрат в данной сфере. Запуск второго этапа поддержки ВИЭ в России предусматривается на период 2025–2035 годов. Другим перспективным направлением в сфере ТЭК России является атомная энергетика.

В разрезе видов энергоресурсов наибольшее количество инновационных проектов реализуется в электроэнергетической отрасли. На втором и третьем местах стоят тепловая и газовая энергетика. Менее всего реализуется инновационных проектов в сфере добычи и производства твердого топлива. Наиболее активно развивающейся в плане

инноваций сферой, по показателю удельного веса предприятий в общем числе обследованных организаций, является распределение газообразного топлива и природного газа, что в первую очередь обусловлено реализуемой программой газификации территории России с объемом инвестиций более 526 млрд. рублей.

В целом инновационную проектную деятельность в сфере ТЭК следует рассматривать как стратегическое направление развития важнейшей структурной составляющей экономики России, ориентированное на оптимизацию процессов добычи, переработки и распределения энергии и на повышение конкурентоспособности государства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Lomazov A.V., Lomazov V.A., Klyosov D.N., Miroshnichenko I.V., Zuev N.P. Fuzzy rule-based classification of complex biogas energy projects. IV International conference on ensuring sustainable development in the context of agriculture. Energy, ecology and earth science. 2024. Vol. 510:04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451004006>
2. Joel O.T., Oguanobi V.U. Geotechnical assessments for renewable energy infrastructure: Ensuring stability in wind and solar projects. *Engineering science & technology journal*. 2024;5(5):1588–1605. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i5.1110>
3. An-Nouaary B., Hmiomi A., Alla L. A comprehensive overview of multicriteria evaluations of renewable energy projects. 7-th International conference on applied economics and business. 2024. P. 329–338. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49951-7_23
4. Savelyeva N.K., Timkina T.A. Business ecosystem: opportunities and threats. In: Geo-economy of the future. 2022;2(2):763–772. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92303-7_79
5. Fokina O.V., Sozinova A.A., Glebova A.G., Nikonova N.V. Improving the quality of project management at energytech through marketing in support of sustainable and environmental development of energy economics. *Frontiers in energy research*. 2022;10:943447. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.943447>
6. Seidu S., Owusu-Manu D.-G., Kukah A.S.K., Adesi M., Oduro-Ofori E., Edwards, D.J. An assessment of the implications of disruptive technologies on the performance of energy infrastructure projects in Ghana. *International journal of energy sector management*. 2023;17(5):887–903. <https://doi.org/10.1108/IJESM-09-2021-0007>
7. Никифоров А.И., Хачатрян Р.С., Долгих М.Г., Шишанов Г.А. Лучшие мировые практики развития аквакультуры в рамках реализации проектов многоцелевого использования инфраструктуры топливно-энергетического комплекса. *Рыбоводство и водное хозяйство*. 2023;8. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2308-01>
8. Nikiforov A.I., Khachatryan R.S., Dolgikh M.G.. The world's best practices in the development of aquaculture in the framework of the implementation of projects for the multipurpose use of the infrastructure of the fuel and energy complex. *Fish breeding and fisheries*. 2023;8. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2308-01>
9. Daramora G.O., Adewunmi A., Jacks B.S., Ajala O.A. Navigation complexities: a review of communication barriers in multinational energy projects. *International journal of applied research in social sciences*. 2024;6(4):685–697. <https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i4.1062>
10. Nweke-Eze C. Infrastructures of Large-Scale Geothermal Energy Projects in Kenya: Materialization, Generativity, and Socio-Economic Development Linkages. *Athens Journal of Sciences*. 2024; 11(2):125–150. <https://doi.org/10.30958/ajs.11-2-4>
11. Mahmood S., Misra P., Sun H., Luqman A. Sustainable infrastructure, energy projects, and economic growth: mediating role of sustainable supply chain management. *Annals of operations research*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05777-6>

11. Patel Y., Younas M., Liu P., Seetharam R. Repurposing offshore infrastructure for clean energy (ROICE) vs. decommissioning – techno-economic considerations. Offshore technology conference. Houston, Texas, USA, May 2024. Paper Number: OTC-35064-MS 2024. <https://doi.org/10.4043/35064-MS>

12. Романова В.В. Правовое обеспечение безопасности международных энергетических инфраструктурных проектов. *Правовой энергетический форум*. 2023;4:6–8. <https://doi.org/10.61525/S231243500029314-3>

Romanova V.V. Legal regulation of the safety of international energy infrastructure projects. *Energy law forum*. 2023;4:6–8. <https://doi.org/10.61525/S231243500029314-3>

13. Salko M.G., Deberdieva E.M., Lenkova O.V., Kovalzhina L.S., Funtikova E.A. The rationale for the implementation of investment projects of the fuel and energy complex. In book: Strategies and trends in organizational and project management. 2022;380:481–487. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94245-8_65

14. Getachew E., Lakner Z., Desalegn G., Tangl A., Boros A. Sustainable financing for renewable energy: examining the impact of sectoral economy on renewable energy consumption. *Economies*. 2024;12(6):127. <https://doi.org/10.3390/economies12060127>

15. Mohandas G. Investing in renewable energy stocks: performance of yield cos in US. *International journal of advanced research in science, communication and technology*. 2024;4(1):197–201. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-15425>

16. Dong Z., Du H. Investing energy transition future: a comprehensive assessment of financial and non-financial factors that affect access to capital. *Economic change and restructuring*. 2024;57:121. <https://doi.org/10.1007/s10644-024-09650-9>

17. Tran H.N., Vu T.C. Investing in renewable energy projects: a look in Vietnam for the period 2016–2023. Asia meeting on environment and electrical engineering (EEE-AM). Hanoi, Vietnam, 2023. P. 01-04. <https://doi.org/10.1109/EEE-AM58328.2023.10395538>

18. Горлов Е.Г., Шумовский А.В. Синтетические жидкие топлива – новые возможности и перспективы. *Neftegaz.ru*. 2019;9. Режим доступа: <https://magazine.neftegaz.ru/archive/495991/> (дата обращения: 30.05.2024).

Gorlov E.G., Shumovsky A.V. Synthetic liquid fuels – new opportunities and prospects. *Neftegaz.ru*. 2019;9. (In Russ.). Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/archive/495991> (accessed: 30.05.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Савельева Н.К. – анализ затрат на разработку и реализацию инновационных проектов в ТЭК России в разрезе стадий производственно-технологической цепочки и видов энергоносителей. Анализ роли возобновляемых источников энергии в производстве электроэнергии;

Созинова А.А. – выявление передовых производственных технологий, наиболее активно применяемых в топливно-энергетическом комплексе России. Оценка уровня инновационной активности отраслей ТЭК;

Фокина О.В. – анализ динамики развития инновационной деятельности в различных сферах ТЭК России. Выявление и обоснование приоритетов инновационной проектной деятельности в топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Savelieva N.K. – cost analysis for the development and implementation of innovative projects in the Russian fuel and energy sector in the context of the stages of the production and technological chain and types of energy carriers. Identification of the role of renewable energy sources in electricity production;

Sozinova A.A. – identification of advanced production technologies that are most actively used in the fuel and energy complex of Russia. Assessment of the level of innovation activity in the fuel and energy sectors;

Fokina O.V. – analysis of the dynamics of innovation development in various areas of the Russian fuel and energy sector. Identification and substantiation of priorities of innovative project activities in the fuel and energy complex of the Russian Federation.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Надежда Константиновна Савельева, доктор экономических наук, профессор, директор института экономики и менеджмента ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-9497-6172>

e-mail: nk_savelyeva@vyatsu.ru

Анастасия Андреевна Созинова, доктор экономических наук, зам. директора института экономики и менеджмента по научной деятельности ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация

<https://orcid.org/0000-0001-5876-2823>

e-mail: aa_sozinova@vyatsu.ru

Ольга Васильевна Фокина, кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой менеджмента и маркетинга ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация

<https://orcid.org/0000-0002-6697-3353>

e-mail: fokina@vyatsu.ru

Поступила в редакцию 01.06.2024

После доработки 30.08.2024

Принята к публикации 04.09.2024

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Nadezhda K. Savelieva, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Director of the Institute of Economics and Management of the Vyatka State University, Kirov, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-9497-6172>

e-mail: nk_savelyeva@vyatsu.ru

Anastasia A. Sozinova, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Deputy. Director of the Institute of Economics and Management for Scientific Activities of the Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

<https://orcid.org/0000-0001-5876-2823>

e-mail: aa_sozinova@vyatsu.ru

Olga V. Fokina, Ph.D. in Economics, Associate Professor, Head of the Department of Management and Marketing, Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

<https://orcid.org/0000-0002-6697-3353>

e-mail: fokina@vyatsu.ru

Received 01.06.2024

Revision 30.08.2024

Accepted 04.09.2024

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: 621.039

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-09>

EDN YKHXXQ

Оригинальная статья / Original paper



Значение надпрофессиональных компетенций студентов технических вузов при формировании отраслевого кадрового резерва ГК «Росатом»

Т.С. Попова¹  , С.В. Волгина¹ , А.А. Попов² , Т.А. Залиско¹ 

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

² Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл.,
Российская Федерация
 tspopova@mephi.ru

Аннотация: В качестве объекта исследования в данной работе была выбрана Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» – многопрофильный холдинг, объединяющий активы в энергетике, машиностроении, строительстве. Предметной областью выбрана бесшовная адаптация выпускников технических вузов при их трудоустройстве на предприятия ГК «Росатом». В нынешних реалиях, в обстановке постоянных перемен и ужесточающихся требований со стороны внешнего макроокружения, в условиях непрерывного образования именно надпрофессиональные компетенции выпускников высших учебных заведений становятся все более востребованными у работодателя. Цель исследования – развитие теоретической и методической базы формирования надпрофессиональных компетенций, которые играют ключевую роль в создании кадрового резерва для таких высокотехнологичных отраслей, как атомная энергетика. В качестве основных методов при написании статьи выступили анализ, синтез, а также теоретический анализ научной литературы по проблематике исследования и локальной документации ГК «Росатом» и ВИТИ НИЯУ МИФИ в части их взаимодействия по вопросам трудоустройства выпускников. Основным результатом исследования выступает вывод о необходимости внедрения современных подходов к обучению студентов в технических вузах и развитию кадров, что позволит создавать мощный резерв квалифицированных специалистов, способных решать сложные задачи в условиях динамично меняющегося технологического ландшафта. Эти компетенции выходят за рамки конкретных предметных знаний и охватывают набор навыков, способностей и качеств, которые являются существенными для успеха в дальнейшей деятельности в качестве готовых специалистов, позволяя лицам, овладевшим надпрофессиональными компетенциями, конкурировать на рынке труда.

Ключевые слова: надпрофессиональные компетенции, soft-skills, ГК «Росатом», технические вузы, кадровый резерв, атомная отрасль.

Для цитирования: Попова Т.С., Волгина С.В., Попов А.А., Залиско Т.А. Значение надпрофессиональных компетенций студентов технических вузов при формировании отраслевого кадрового резерва ГК «Росатом». *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(3):101–108. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-09>

For citation: Popova T.S., Volgina S.V., Popov A.A., Zalisko T.A. Importance of supraprofessional competences of technical university students in the Rosatom State Corporation's sectoral personnel reserve formation. *Global nuclear safety*. 2024;14(3):101–108. (In Rus). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-03-09>

Importance of supraprofessional competences of technical university students in the Rosatom State Corporation's sectoral personnel reserve formation

Tatiana S. Popova  , Svetlana V. Volgina , Andrey A. Popov , Tatiana A. Zalisko 

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

² Atommash the branch of JSC AEM-Technologies in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 tspopova@mephi.ru

Abstract. The State Atomic Energy Corporation ‘Rosatom’, a diversified holding company combining assets in power engineering, mechanical engineering, and construction, is chosen as the research object in this paper. The subject area chosen is the seamless adaptation of technical university graduates during their employment at the enterprises of Rosatom State Corporation. It is the supraprofessional competences of university graduates that are becoming more and more demanded by employers in the current realities, in the environment of constant changes and tougher requirements from the external macro-environment, in the conditions of continuous education. The aim of the study is to develop a theoretical and methodological basis of the supraprofessional competencies formation, which play a key role in creating a personnel reserve for such high-tech industries as nuclear power engineering. The main methods used in writing the article are analysis, synthesis, as well as theoretical analysis of scientific literature on the research problem and local documentation of Rosatom State Corporation and VETI MEPhI in terms of their interaction on the graduate employment issues. The main result of the study is the conclusion that it is necessary to introduce modern approaches to student education in technical universities and personnel development which will create a powerful pool of qualified specialists capable of solving complex problems in a dynamically changing technological landscape. These competencies go beyond specific subject knowledge and encompass a set of skills, abilities and qualities that are essential for success in further activities as trained specialists, allowing individuals who have mastered supraprofessional competencies to compete in the labor market.

Keywords: supraprofessional competencies, soft-skills, Rosatom State Corporation, technical universities, talent pool, nuclear industry.

Введение

Для достижения технологического суверенитета необходима модернизация системы образования и создание новых форматов практико-ориентированной подготовки. Мир ждут значительные изменения в производственных системах, которые будут характеризоваться ростом интеллектуализации и роботизации, а также внедрением экологически чистых технологий. Эти изменения требуют новых квалификационных требований и высокого качества рабочих мест. В ближайшие годы радикально изменятся рабочие места, что обуславливает необходимость подготовки кадров для новых технологических цепочек и рынков.

Надпрофессиональные компетенции (или soft-skills) включают в себя разные навыки и качества, которые дополняют профессиональные знания и умения – рисунок 1.

Благодаря проекту «Центры компетенций» президентской платформы «Россия – страна возможностей», работа по оценке и анализу блока надпрофессиональных компетенций в высшей школе становится системной. В настоящее время охвачена треть системы высшего образования. Сейчас уже есть возможность определять уровень надпрофессиональных навыков у студентов при поступлении, в процессе обучения и на выходе из вуза. Это позволяет правильно корректировать образовательные программы и формировать внеучебные активности. И, конечно, паспорта компетенций студентов – это значимый показатель для работодателя. Активность, устремленность к цели, способность работать в команде и прочие «мягкие» навыки, которые всем хорошо известны, определяют ценность сотрудника.

Коммуникационные навыки

- Умение ясно и логично излагать мысли как устно, так и письменно, работать в команде и эффективно взаимодействовать с коллегами и клиентами.

Критическое мышление и решение проблем

- Способность анализировать ситуации, выявлять основные проблемы и находить эффективные решения.

Управление временем

- Эффективное планирование и организация рабочего времени для повышения личной продуктивности (производительности труда), а в конечном итоге и коллективной.

Адаптивность и гибкость

- Умение быстро адаптироваться к изменениям и новым условиям, что особенно важно в условиях быстро развивающейся технологии.

Лидерство и командная работа

- Способность вести за собой команду, делегировать задачи и эффективно существовать в команде.

Креативность

- Умение генерировать новые идеи и подходы к решению задач.

*Рисунок 1. Основные надпрофессиональные компетенции студентов (составлено авторами)
Figure 1. Basic supraprofessional competences of students*

Материалы и методы

Для понимания смысла дефиниции «надпрофессиональные компетенции» следует обратить внимание на исследования других авторов, посвятивших свои работы аналогичной теме. Давая определение «надпрофессиональным компетенциям», Копытова С.М. трактует их как «... условие, способное минимизировать узконаправленность специалиста, т.е. способность выполнять только определенный набор действий [1]. Это подтверждает позицию авторов относительно универсальности надпрофессиональных компетенций для выпускников любых направлений подготовки.

Заслуживает также внимания позиция, представленная Антроповой Н.А., в соответствии с которой надпрофессиональные компетенции – множество персональных и социальных качеств, формирующих наряду с профессиональной компетентностью основу любой профессиональной деятельности (от секретаря до директора) и являющихся предпосылкой для своевременной адаптации

работника к постоянно меняющимся социальным условиям [2].

Не менее интересна позиция В.Г. Коноваловой, в работах которой выделены основные «надпрофессиональные» компетенции, которые будут востребованы работодателями в ближайшие годы – как «цифровые», связанные с применением современных информационно-коммуникационных технологий, так и познавательные, социальные и эмоциональные, не свойственные машинам, но необходимые в т.ч. для сотрудничества с искусственным интеллектом¹.

¹ Коновалова В.Г. Актуальные профессиональные и «надпрофессиональные» компетенции: прогнозы и ожидания работодателей. Управление персоналом. Профорентация и задачи развития партнерского взаимодействия: Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции 2018, Москва, 25 декабря 2018 года. Москва: Знание-М, 2020. С. 11–14. EDN KNCQMY

Некоторые из авторов (к примеру, И.А. Погребная, С.В. Михайлова) акцентировали внимание в своих исследованиях на компетенции, закладываемые у выпускников именно технических вузов. В их работах выделены три группы надпрофессиональных компетенций, как наиболее дефицитные: компетенции личностного развития, когнитивные компетенции и коммуникативные компетенции [3]. Позиция авторов сводится к тому, что требуемые временем, уровнем развития социума и производства, надпрофессиональные компетенции могут и должны развиваться и совершенствоваться непрерывно, в течение всей жизни человека. Между тем, их актуализация и основы могут и должны быть заложены в период профессионального образования. Нет оснований не согласиться с данным утверждением, так как личностные характеристики индивидуума и связанные с ними ценности, склонности, внутренние установки, мотивы и амбиции являются фактором, определяющим его отношение к деятельности и заинтересованность в лучших результатах.

Обсуждение и результаты

Надпрофессиональные компетенции играют ключевую роль в формировании высококлассных специалистов, способных успешно работать в динамичных и требовательных высокотехнологичных отраслях. Студентам технических вузов стоит уделять особое внимание развитию этих навыков, что позволит им стать лидерами и инновационными мыслителями будущего. Комплексный подход к образованию, включающий как технические, так и мягкие навыки, является залогом успешной карьеры и профессионального роста [4].

Надпрофессиональные компетенции, такие как эффективное обучение и саморазвитие, умение работать в команде, быстро принимать решения и действовать в новых условиях становятся все более важными для карьерного роста. Корреляция между универсальными компетенциями и профессиональным успехом очевидна, поскольку специалисты, обладающие этими навыками, способны быстрее адаптироваться к посто-

янно меняющимся условиям, выделяться на фоне конкурентов и достигать профессиональных целей. «Гибкие навыки» напрямую влияют на бизнес-показатели российских компаний, большинство из которых сегодня работают с учетом разного рода внешних ограничений и санкций. Потому сотрудники, способные находить нестандартные решения, быстро реагировать на новые вызовы и эффективно взаимодействовать как внутри компании, так и за ее пределами, помогают предприятиям повысить эффективность всех производственных процессов, как следствие, сделать бизнес успешным, стать лидером на рынке.

Важным аспектом является сотрудничество вузов с предприятиями отрасли для определения потребностей работодателей в контексте надпрофессиональных навыков и интеграции этих требований в учебные программы. В атомной отрасли России работает свыше 300 тыс. человек. Из них около 80 тыс. – молодые люди в возрасте до 35 лет. И 1–1,2 тыс. человек ежегодно приходят из вузов – это порядка 80% всего набора персонала на предприятия атомной отрасли в стране (за год с внешнего рынка набирают в среднем 1,5 тыс. человек). Политика ГК «Росатом» состоит в том, чтобы возвращать собственные кадры с самого нижнего уровня. Невозможно найти на внешнем рынке готового директора атомной станции, и для того, чтобы эти кадры были, и чтобы потом они «росли» внутри компании, важно выстраивать работу с ключевыми техническими вузами страны – опорными вузами Росатома.

Проще всего на работу в Росатом попасть выпускнику одного из вузов, входящих в ассоциацию высших учебных заведений «Консорциум опорных вузов Государственной корпорации по атомной энергии Росатом». Это сообщество высших учебных заведений, созданное с целью координации деятельности в интересах атомной отрасли в сфере высшего, послевузовского и дополнительного профессионального образования, а также в научной сфере. Фактически они – главные поставщики кадров в атомную отрасль на протяжении последних лет. НИЯУ МИФИ – базовый вуз Росатома. Госкорпорация фи-

нансирует ему закупки современного научного и учебного оборудования, разрабатывает и модернизирует программы обучения, внедряет современные учебно-методические материалы. Кроме того, на базе НИЯУ МИФИ действует Центр карьеры «Росатома», специалисты которого помогают студентам понять, на каких предприятиях они могут быть востребованы.

«Академия Росатома» активно работает с преподавателями вузов, обучая их развивать в будущих сотрудниках отрасли так называемые *soft skills* – неспециализированные навыки, позволяющие быть успешными в профессии: умение работать в команде, ответственность, эмоциональный интеллект, критическое мышление, управление временем. Таким образом «Росатом» влияет на все вузы, входящие в консорциум, помогая адаптировать учебные программы к современному состоянию отраслевого рынка труда.

В рамках исследования стоит отдельно рассмотреть опыт НИЯУ МИФИ. Президентской платформой «Россия – страна возможностей» в НИЯУ МИФИ был открыт Центр компетенций, который с 2023 г. начал выдачу Паспортов компетенций. Этот документ является подтверждением результатов оценки «гибких навыков» выпускников. ГК «Росатом» будет учитывать Паспорта компетенций выпускников университета и его филиалов при трудоустройстве студентов и в ходе дальнейшего карьерного развития молодых специалистов атомной отрасли. Паспорт универсальных компетенций – документ, который показывает уровень развития надпрофессиональных навыков каждого выпускника – то есть личных качеств, без которых не обойтись ни в одной профессии – мотивацию, стрессоустойчивость, коммуникативные качества, способность анализировать информацию, лидерство, умение работать в команде. Паспорт компетенций является конкурентным преимуществом, поскольку при приеме на работу работодатель может соотнести стартовые возможности выпускника и уровень развития универсальных навыков молодого специалиста с требованиями к должности и правилами корпоративной культуры организации.

ГК «Росатом» начала учитывать Паспорта компетенций студентов НИЯУ МИФИ, и это, безусловно, значимая веха в истории развития проекта «Центры компетенций». Самые разные компании привлекают к себе выпускников, прошедших диагностику, отбирают их на основе тех компетенций, которые развиты у студентов. Но заявление Росатома о том, что все дочерние структуры должны поддерживать это направление, обращать внимание своих кадровых служб на высокопотенциальных студентов, выявляемых при помощи подобных инструментов, – это сигнал другим крупным работодателям к тому, чтобы присоединиться.

Благодаря такому взаимовыгодному сотрудничеству работодатель имеет представление о будущем кандидате, может формировать для университета более четкий запрос на молодых специалистов – исходя из корпоративного подхода к ожидаемым от потенциального сотрудника универсальным компетенциям. Паспорт компетенций – это не только профиль навыков выпускника, на который может ориентироваться работодатель, но и индикатор качества проведенной вузом работы по обновлению образовательных программ, организации внеучебной деятельности студентов, итогом которой является подготовка специалистов в соответствии с актуальными требованиями индустрии. Признание паспортов ключевым партнером университета ГК «Росатом» показывает, что вуз движется в верном направлении – к бесшовной траектории формирования отраслевого кадрового резерва.

Чтобы успешно справляться с вызовами, стоящими перед атомной энергетикой, важна интеграция теоретических знаний с практическим опытом. В этом контексте программы стажировок позволяют студентам не только ознакомиться с текущими проектами, но и непосредственно участвовать в их реализации. Это создает уникальную возможность для формирования практических навыков и осознания ответственности, которая ложится на плечи специалистов в высокотехнологичной области. Кроме того, активное участие студентов в проектных конкурсах способствует развитию креатив-

ного мышления и инновационного подхода к решению задач. Конкурсы часто требуют комплексного подхода, что в свою очередь формирует у молодежи способность видеть проблему с различных точек зрения и находить нестандартные решения. Это особенно важно в условиях быстро меняющегося технологического рынка, где традиционные методы могут оказаться неэффективными. Наставничество, как важный элемент образовательного процесса, создает условия для передачи знаний от опытных специалистов к новым кадрам, что способствует не только личностному, но и профессиональному росту студентов. Благодаря таким формам взаимодействия закладываются основы для формирования системы непрерывного обучения, которая поможет подготовить квалифицированные кадры, соответствующие требованиям времени².

Совместные проекты с промышленными компаниями, как правило, требуют от студентов применения знаний в реальных условиях. Это сотрудничество не только углубляет их понимание теоретических концепций, но и позволяет увидеть, как они реализуются на практике. Участие в таких инициативах формирует у будущих специалистов умение работать в команде, принимать решения под давлением и адаптироваться к динамичным условиям. Также важно, что подобные программы способствуют созданию сети профессиональных контактов. Студенты, взаимодействуя с экспертами и коллегами, могут обмениваться опытом и идеями, что обогащает их знания и расширяет горизонты. Networking в такой высокотехнологичной области, как атомная энергетика, открывает двери к будущим возможностям трудоустройства и сотрудничества.

Наконец, важно отметить, что вовлечение молодежи в атомную энергетику – это не

только подготовка специалистов, но и формирование ответственного отношения к экологии и безопасности. Знания о современных технологиях и их влиянии на окружающую среду способствуют развитию осознанного подхода к использованию ядерной энергии, что является необходимым для устойчивого будущего. Сотрудничество с промышленными компаниями не только обогащает образовательный процесс, но и способствует созданию зрелых, профессионально подготовленных специалистов, готовых к вызовам будущего в области атомной энергетики и смежных отраслей. Важно, чтобы такие инициативы продолжали развиваться, адаптируясь к потребностям рынка труда и ожиданиям индустрии.

Заключение

В заключение можно сказать, что формирование надпрофессиональных компетенций у студентов технических вузов является стратегически важной задачей, направленной на создание высококвалифицированного кадрового резерва для ГК «Росатом». Комплексный подход к развитию критического мышления, умения работать в команде, креативности и адаптивности обеспечивает подготовку специалистов, готовых к эффективной работе в условиях современных вызовов и быстрых изменений в атомной отрасли. Это, в свою очередь, способствует общему прогрессу и безопасному развитию ядерной энергетики в России и в мире. В Госкорпорации «Росатом» в равной степени важно развитие как профессиональных компетенций, так и надпрофессиональных навыков человека, которые позволяют творчески, нестандартно, при этом эффективно и социально приемлемо выполнять поставленные задачи и добиваться успеха. Они должны взаимодополнять друг друга и способствовать комплексному развитию человека.

² Ибрагимова Л.А., Михайлова С.В. Диагностический инструментарий оценки развития надпрофессиональных компетенций студентов вуза: методические рекомендации. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2021. – 45 с. – ISBN 978-5-00047-613-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Копытова С.М. Надпрофессиональные компетенции как признак эффективности специалиста. *Научное обозрение. Педагогические науки*. 2023;5:26–30. <https://doi.org/10.17513/srps.2500> EDN QFLJTE.
2. Антропова Н.А. Надпрофессиональные компетенции как фактор успеха в профессиональной деятельности. *Международный журнал экспериментального образования*. 2011;3:157–158. EDN RATSRX. Режим доступа: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=1290> (дата обращения: 13.05.2024).
Antropova N.A. Supraprofessional competencies as a factor of success in professional activity. *International journal of experimental education*. 2011;3:157–158. (In Russ.). EDN RATSRX. Available at: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=1290> (accessed: 13.05.2024).
3. Погребная И.А., Михайлова С.В. Моделирование образовательного процесса технического вуза, направленного на развитие надпрофессиональных компетенций обучающихся. *Современный ученый*. 2021;1:96–100. EDN SLASSW. Режим доступа: <https://su-journal.ru/wp-content/uploads/2021/01/su-1.pdf> (дата обращения: 13.05.2024).
Pogrebnaia I.A., Mikhaylova S.V. Modeling of educational process of technical university aimed at the development of students' supraprofessional competencies. *Modern scientist*. (In Russ.). Available at: <https://su-journal.ru/wp-content/uploads/2021/01/su-1.pdf> (accessed: 13.05.2024).
4. Солнцев М.А. Твердые и мягкие компетенции сотрудников сервисных компаний при работе с клиентами. *Практический маркетинг*. 2021;11(297):42–48. EDN CSFNMO. <https://doi.org/10.24412/2071-3762-2021-11297-42-48>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Попова Т.С. – концепция и качественная разработка исследования, написание текста статьи;
Волгина С.В. – анализ и оценка предметной области исследования, редактирование текста статьи;
Попов А.А. – изучение тематического материала, систематизация информации;
Залиско Т.А. – изучение теоретических источников по исследуемой проблематике.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Попова Татьяна Сергеевна, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
<https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>
e-mail: TSPopova@mephi.ru

Волгина Светлана Васильевна, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Popova T.S. – the concept and qualitative development of the study, writing the text of the article;
Volgina S.V. – analysis and assessment of the subject area of research, editing the text of the article;
Popov A.A. – studying thematic material, systematizing information;
Zalisko T.A. – study of theoretical sources on the issues under study.

FUNDING:

The study has no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Tatyana S. Popova, Cand. Sci. (Ecom.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
<https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>
e-mail: TSPopova@mephi.ru

Svetlana V. Volgina, Cand. Sci. (Ecom.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov

«МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл.,
Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0003-3425-8627>

e-mail: SVVolgina@mephi.ru

Андрей Александрович Попов, ведущий
специалист по инвестиционному развитию
Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г.
Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл.,
Российская Федерация;

<https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atom mash.ru

Залиско Татьяна Александровна, специалист
отдела социально-воспитательной работы,
Волгодонский инженерно-технический институт
– филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск,
Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0003-6059-4752>

e-mail: TAZalisko@mephi.ru

region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0003-3425-8627>

e-mail: SVVolgina@mephi.ru

Andrey A. Popov, Leading Specialist in Investment
Development of Atom mash the branch of JSC AEM-
Technologies in Volgogradsk, Volgogradsk, Rostov
region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atom mash.ru

Tatiana A. Zalisko, Specialist, Department of
Social and Educational Work, Volgogradsk Engineer-
ing Technical Institute the branch of National
Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0003-6059-4752>

e-mail: TAZalisko@mephi.ru

Поступила в редакцию 29.05.2024

После доработки 27.08.2024

Принята к публикации 05.09.2024

Received 29.05.2024

Revision 27.08.2024

Accepted 05.09.2024

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Волгина С.В.	101
Воробьев Е.В.	27
Воротников В.А.	56
Головко М.В.	73
Довбыш В.Е.	73
Елохин А.П.	6, 42
Залиско Т.А.	101
Злобин А.Ю.	27
Иванов С.О.	35
Колтун О.В.	35
Ксенофонтов А.И.	42
Лотарев А.А.	56
Музафаров А.Р.	62
Новоселов Г.Д.	27
Орумо К.Б.	42
Поваров П.В.	27
Попов А.А.	101
Попова Т.С.	101
Руденко В.А.	73
Савандер В.И.	62
Савельева Н.К.	87
Свешников Н.М.	6
Созинова А.А.	87
Томилин С.А.	73
Улин С.Е.	6
Усачев Д.Е.	56
Фокина О.В.	87
Цыхлер Л.В.	27
Шустов А.Е.	6
Щукин А.П.	56
Якубов Д.В.	35

AUTHOR INDEX

Elokhin A.P.	6, 42
Dovbish V.E.	73
Fokina O.V.	87
Golovko M.V.	73
Ivanov S.O.	35
Koltun O.V.	35
Ksenafontov A.I.	42
Lotarev A.A.	56
Muzafarov A.R.	62
Novoselov G.D.	27
Orumo K.B.	42
Popov A.A.	101
Popova T.S.	101
Povarov P.V.	27
Rudenko V.A.	73
Savander V.I.	62
Saveliva N.K.	87
Shchukin A.P.	56
Shustov A.E.	6
Sozuna A.A.	87
Sveshnikov N.M.	6
Tomilin S.A.	73
Tsykhler L.V.	27
Ulin S.E.	6
Usachev D.E.	56
Volgina S.V.	101
Vorobiev E.V.	27
Vorotnikov V.A.	56
Yakubov D.V.	35
Zalisko T.A.	101
Zlobin A.Y.	27

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Полный текст статьи для опубликования должен быть оригинальным – не более 20% заимствований, сопровождаться экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, соответствовать приведенным ниже правилам оформления.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- индекс УДК;
- название на русском и английском языках;
- инициалы и фамилия авторов на русском и английском языках;
- аффилиация каждого автора на русском и английском языках;
- структурированная по IMRAD аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- текст статьи;
- объединенный Список литературы / References (см. пример оформления);
- сведения об авторах (для каждого автора – Фамилия Имя Отчество, место/а работы, должность/и, ученая степень, звание, электронный адрес, индекс ORCID (<http://orcid.org>), телефон контактного автора) на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована: введение (актуальность темы; обзор проблемы; цель работы); методология (теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов; описание материалов и методов анализа; статистическая обработка); результаты и их обсуждение; заключение (выводы). Цель и ключевые результаты работы должны быть понятно представлены в аннотации и тексте статьи, научная новизна работы обоснована во введении со ссылкой на источники, опубликованные в научных рецензируемых изданиях (в том числе зарубежных) последних нескольких лет. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы и полученные результаты.

Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и упоминаться в тексте статьи непосредственно перед самими формулами.

Включение таблиц в статью должно быть целесообразным, сопровождаться нумерацией, заголовками на русском и английском языках (10 пт) и ссылками в тексте непосредственно перед самими таблицами.

Рисунки должны быть четкими, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами.

Статья оформляется в Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 через 1 интервал, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, без знаков принудительного переноса и дополнительных пробелов. Поля со всех сторон – 2 см. Желательный объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (количество источников определяется автором исходя из поставленной научно-исследовательской цели). Если в тексте менее 2500 знаков, статья может быть отклонена экспертами.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт России, стран СНГ и дальнего зарубежья по рассматриваемой проблематике. Объединенный список литературы / References приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте и оформляется в стиле Vancouver, но без сокращения названий журналов. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала.

Не включаются в список литературы источники, которые никогда не будут проиндексированы в базах данных цитирования: ГОСТы, нормативные и законодательные акты, внутренние документы предприятий (доклады, отчеты, протоколы и т.д.), официальные сайты организаций, словари, справочники, учебники и т.д. Такие источники цитируются непосредственно в тексте или в постраничных сносках согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008 <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=173511> с указанием выходных данных и режима доступа, по которым их можно найти в Интернете. Доклады конференций могут быть включены в список литературы, если они доступны в Интернете, при этом указывается режим доступа и дата обращения.

Для соблюдения правил слепого рецензирования необходимо создать копию файла со статьей, удалить персональные данные, содержащиеся в тексте файла и его свойствах (в тексте статьи удалить имена авторов и наименования их мест работы, ссылки на работы авторов в списке литературы заменить на «Автор, год», информацию об авторах следует удалить из свойств документа), сохранить в формате pdf с названием «На рецензирование_Название/начало названия статьи...».

Для принятия статьи в номер журнала необходимо загрузить файл со статьей в формате Word на платформе elpub – <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> – и предоставить следующие материалы по электронной почте opiviti@mephi.ru:

- согласие на обработку персональных данных;
- файл со статьей в формате Word;
- итоговый (после доработки) файл в формате pdf с подписью авторов;
- файл со статьей в формате pdf для слепого рецензирования;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

1. Северцев Н.А., Юрков Н.К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. 568 с. Режим доступа: <https://elib.pnzgu.ru/library/1699606807> (дата обращения: 30.01.2024).
Severtsev N.A., Yurkov N.K. Safety of dynamic systems at the stages of life cycle. Monograph. Penza: Publishing house of Penza State University, 2023. 568 p. (In Russ.) Available at: <https://elib.pnzgu.ru/library/1699606807> (accessed: 30.01.2024).
2. Файков Д.Ю., Байдаров Д.Ю. Диверсификация в атомной отрасли: современное состояние, особенности, перспективы. *Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России*. 2021;2:41–48. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46289137> (дата обращения: 30.01.2024).
Faykov D.Yu., Baidarov D.Yu. Diversification in the nuclear industry: current state, features, prospects. *Scientific bulletin of the military-industrial complex of Russia*. 2021;2:41–48. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46289137> (accessed: 30.01.2024).
3. Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Мясников С.В., Петрунин Н.В., Терашкевич С.С. Эксплуатационный контроль состояния металла корпусов растворных реакторов в НИЦ «Курчатовский институт». *Вопросы материаловедения*. 2022;(4(112)):191–198. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>
Boikova T.V., Kochnov Y.O., Myasnikov S.V., Petrunin N.V., Terashkevich S.S. Operational monitoring of the metal of solution pressure vessel reactors at NRC «Kurchatov institute». *Voprosy Materialovedeniya*. 2022;4(112):191–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>
4. Антонов А.Ю., Васильева С.В., Рубцов В.С., Тутнов И.А., Шпара И.А. Метод схематизации дефектов в кольцевых сварных соединениях трубопроводов. *Наука и техника в газовой промышленности*. 2022;4:82–89. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_50001041_15889718.pdf (дата обращения: 30.01.2024).
Antonov A.Yu., Vasilieva S.V., Rubtsov V.S., Tutnov I.A., Shpara I.A. Method of schematization of defects in annular welded joints of pipelines. *Science and technology in the gas industry*. 2022;4:82–89. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_50001041_15889718.pdf (accessed: 30.01.2024).
5. Соболев А.В., Тутнов И.А., Царев В.С., Украинцев В.Ф. Метод интегральной оценки надежности оборудования и персонала энергоблока АЭС при длительном сроке эксплуатации. *Атомная энергия*. 2021;130(3):152–158. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4279/4857> (дата обращения: 30.01.2024).
Sobolev A.V., Tutnov I.A., Tsarev V.S., Ukraintsev V.F. Method of integral reliability assessment of equipment and personnel of long-operating NPP power unit. *Atomic Energy*. 2021;130(3):161–166. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47521153> (accessed: 30.01.2024).
6. Камышев А.В., Данилов А.В., Пасманик Л.А. [и др.] Применение метода акустоупругости для определения остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях. *В мире неразрушающего контроля*. 2020;23(3):10–17. <https://doi.org/10.12737/1609-3178-2020-10-17>
Kamyshv A.V., Danilov A.V., Pasmanik L.A. [et. al.] Apply the Acoustoelastic Method to Determine Residual Stresses in Welded Joints. *NDT World*. 2020;23(3):10–17. <https://doi.org/10.12737/1609-3178-2020-10-17>
7. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Ровинский В.Д., Гетман А.Ф., Губа С.В. Способ определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов (варианты). Патент RU 2711082 C1 Российская Федерация, МПК G01N 29/07 (2006.01). № 2019110165/28. Заявлен: 05.04.2019. Опубликовано: 15.01.2020. 6 с. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115 (дата обращения 10.01.2024).
Kamyshv A.V. Pasmanik L.A., Rovinskij V.D., Getman A.F., Guba S.V. Method for determination of residual stresses in weld metal welded joints of pipelines (versions). Patent Russia RU 2711082 C1: 15.01.2020. (In Russ.) Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115 (accessed: 10.01.2024).
8. Гетман А.Ф. Теории и технологии обеспечения прочности технических объектов. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2019. 629 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010147510> (дата обращения 10.01.2024).
Getman A.F. Theories and technologies for ensuring the strength of technical objects. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2019. 629. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010147510> (accessed: 10.01.2024).
9. Appleton J.D., Kendall G.M. Gamma-radiation levels outdoors in Great Britain based on K, Th and U geochemical data. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022;251-252:106948. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106948>
10. Folly C.L., Konstantinoudis G., Mazzei-Abba A., Kreis C., Bucher B., Furrer R., Spycher B.D. Bayesian spatial modelling of terrestrial radiation in Switzerland. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;233:106571 <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106571>

Адрес редакции журнала:

347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94

Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», oni-viti@mephi.ru

Выпускающий редактор: Лобковская Надежда Ивановна, +79281883628, NILobkovskaya@mephi.ru

NOTES FOR AUTHORS

(!) Please, pay attention: the article formatting requirements have been updated in order to expand the international readership of the journal since

The full text of the article to be published must be original – no more than 20% borrowings, it must be accompanied by an expert resolution on publication possibility in the open press, and it must comply with the following rules.

One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title in Russian and English;
- authors' initials and surnames in Russian and English;
- an affiliation in Russian and English for each author;
- the structured abstract (200-250 words) in Russian and English according to IMRAD;
- keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- article text;
- Combined List of References / References (see example design);
- information about the authors in Russian and English (each author should provide a full name, a place of work, position/s, an academic degree, a rank, e-mail address, ORCID index (<http://orcid.org>), contact phone number).

The article should be structured: introduction (relevance of the topic; review of the problem; purpose of the work); methodology (issue theory; detailed description of experiment methodology; description of materials and methods of analysis; statistical processing); results and their discussion; conclusions. The objective and key results of the work should be clearly presented in the abstract and the text of the article, the scientific novelty of the work is justified in the introduction with reference to the sources published in scientific peer-reviewed publications (including foreign ones) in the last few years. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The Equation 3.0 editor is recommended when writing formulas. All formulas are aligned to the center of the page, numbered in parentheses on the right and referred to in the text of the article just ahead of the formulas.

Inclusion of tables in the article should be appropriate, they should be numbered and have headings in Russian and English (10 pf) and links in the text just ahead of the tables.

Figures should be clear, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions.

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Without any signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article is no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (the number of sources is determined by the author on the basis of the research objective). If the text of the article is less than 2500 type characters, the article may be rejected by experts.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of Russia, the CIS and foreign countries on the subject matter in the articles. The combined List of References is given at the end of the article in the order of mention in the text, in Vancouver style, but without abbreviating the names of the journals. References to foreign sources should be given in their original language.

Sources that will never be indexed in citation databases are not included in the reference list: State Standards, normative and legislative acts, internal documents of companies (reports, protocols, etc.), official websites of organisations, dictionaries, reference books, textbooks, etc. Such sources are cited directly in the text or in page footnotes according to State Standard R 7.0.5-2008 <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=173511> with indication of output data and URL where they can be found on the Internet. Conference papers may be included in the list of references if they are available on the Internet, indicating the URL and the date of reference.

To comply with the rules of blind peer review, a copy of the file with the article should be created, personal data contained in the text of the file and its properties should be deleted (authors' names and the names of their places of work in the text of the article should be deleted, references to authors' works in the list of references should be replaced by «Author, year», information about authors should be removed from the document properties), saved in pdf format with the title «To review_Title/start title of article...».

To be accepted into the journal issue, the article must be uploaded as a Word file on the elpub platform - <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index> - and the following materials must be sent by email oni-viti@mephi.ru:

- consent to personal data processing;
- an article file in Word format;
- final (after revision) pdf file signed by the authors;
- a pdf file of the article for blind peer review;
- an expert analysis of publication possibility in the open press.

THE LIST OF REFERENCES STANDARD

1. Kirkin A.M., Kuryndin A.V., Sinegribov S.V. [et al.] The problem of modeling the geometry of Twisted Fuel Rods with X-type cross section in the performance of thermohydraulic calculations. *Global Nuclear Safety*. 2023;13(1):23–35 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-03>
2. Kulamer B., Meester W., Salk Ju., Recommended Practices to Ensure Technical Conference Content Quality. *Science Editor and Publisher*. 2017;2(1):47–51. <https://doi.org/10.24069/2542-0267-2017-1-1-12>
3. Stevens M.R., Park K., Tian G. et al. Why Do Some Articles in Planning Journals Get Cited More than Others? *Journal of Planning Education and Research*. 2022;42(3):442–463. <https://doi.org/10.1177/0739456X19827083>
4. Small H., Boyack K. W., Klavans R. Citations and certainty: a new interpretation of citation counts. *Scientometrics*. 2019;118(2):1079–1092. <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03016-z>
5. Barie E. Z., Chang C. Application of variable frequency drive on the condensate pump motors of APR1400 nuclear power plants for energy savings. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2018;8(1):179–189. <https://doi.org/10.1080/22348972.2018.1515691>
6. Rashitov P.A., Seregin D.A., Anikin M.D., Vershanskiy E.A. Application of multilevel voltage inverters in distributed series compensation devices. *Bulletin MPEI*. 2021;3:58–66 (In Russ.) <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66>
7. Surin V.I., Beketov V.G., Abu Ghazal A.A., Alwaheba A.I. Spectral analysis method of electrophysical non-destructive testing data. *Journal of Physics: Conference Series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061 (In Russ.) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052061>
8. Erd A., Stokłosa J. Main design guidelines for battery management systems for traction purposes. Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference Automotive Safety. 2018. Slovakia. <https://doi.org/10.1109/AUTOSAFE.2018.8373345>
9. Chernov E.V. Development and application of WWER1000 PC based simulators for education and training in NRNU MEPhI. Developing a systematic education and training approach using personal computer based simulators for nuclear power programmes proceedings of a technical meeting. Vienna. 15–19 May. 2017:96–98. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1836web.pdf> (accessed: 10.05.2023).
10. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. SpringerBriefs in Statistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin. Heidelberg, 2020. ISBN 978-3-662-62435-7. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62436-4> (accessed: 19.05.2023).

Editorial office address (for sending printed correspondence):

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

Editorial office of «Global Nuclear Safety» journal, oni-viti@mephi.ru

Executive Editor: Nadezhda I. Lobkovskaya, +79281883628, NILobkovskaya@mephi.ru
