

Журнал включен в перечень ВАК РФ (1037)

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

Валентин Ефимович Шукицунов, 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 технических наук, Институт производственных систем и технологий конструирования ИПК Общества Фраунгофера, Германия

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

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

Александр Рональдovich Ингеманссон, доктор технических наук, АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», Российская Федерация

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

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

Компьютерная верстка:

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

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

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

Периодичность: 4 номера в год

Учредитель и издатель: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

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

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

Выход в свет: 27.06.2024

Тираж: 300 экз.

Цена: Свободная

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



Научное издание. Знаком информационной продукции не маркируется согласно п. 2 ст. 1 ФЗ № 436-ФЗ от 29.12.2010 г

Москва

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2024

National Research Nuclear University MEPHI

Global Nuclear Safety

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

Vol. 14, No. 2, 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

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

Alexandr P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, MEPHI, 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 M. Fomenko, Dr. Sci. (Econ.), Plekhanov Russian University of Economics, Russian Federation

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

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

Computer layout:

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

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

Founded in November, 2011 Reg. № FS77-47155, November, 3 2011

Quarterly

Founder and Publisher: National Research Nuclear University MEPHI

Editorial address: Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation

Printing house: PPS VETI NRNU MEPHI, Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgogradsk, 347360, Russian Federation

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

Published on: 27.06.2024

The circulation is: 300 copies

The price: Is free

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



Moscow

National Research Nuclear University MEPHI, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Том 14, № 2 (51), 2024

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

О концепции обеспечения ядерной безопасности МТИР-СКД

А.С. Лапин, В.Ю. Бландинский, В.А. Невиница, П.А. Фомиченко, Ю.Н. Волков 5

Исследование целесообразности сочетания солнечной электростанции с реактором малой мощности для опреснения морской воды

М.М. Салех, А.А. Абдельразек, А.Ф. Мохаммед, А.А. Калютник, Е.А. Соколова 20

Нейтронное излучение источника движущегося в гравитационном поле

В.Я. Штицер, В.В. Кривин 31

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности уплотнений элементов локализирующих систем безопасности энергоблоков с ВВЭР

С.Б. Кравец, С.А. Кузин, В.М. Сапельников, С.Е. Синельщикова, А.А. Поволоцкая, В.Г. Бекетов 40

Оптимизация программно-управляемой механической обработки ответственных деталей трубопроводной арматуры

К.А. Винничук, А.А. Моисеенко, Н.Н. Подрезов, С.А. Томилин 52

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Методы и средства обеспечения точности измерений изгибных деформаций стыковочного патрубка между реактором ВВЭР и парогенератором в условиях топливной кампании

Ю.В. Красников, В.П. Поваров, А.М. Степанов, С.Г. Фиш 61

Многоточечная модель кинетики с мощностным эффектом реактивности для контроля аксиального офсета реактора ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой

С.С. Правосуд, Я.О. Якубов, В.А. Сусакин 73

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

Укомплектованность кадрами электроэнергетики Российской Федерации в условиях цифровой трансформации

Н.К. Савельева, А.А. Созинова, М.В. Макарова 91

Искусственный интеллект в преподавании технического английского языка студентам-атомщикам

И.В. Зарочинцева, Ю.А. Лутиногина, Л.В. Захарова, О.А. Кикинчук 103

Преобразование ядерного права Российской Федерации в самостоятельную публичную комплексную отрасль права как способ укрепления глобальной ядерной безопасности в мире

В.Т. Корниенко, О.А. Макеева, Е.А. Брагина 112

Авторский указатель номера 2 (51), 2024 121

CONTENTS

Vol. 14, No 2, 2024

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

MTIR-SCP nuclear safety concept

A.S. Lapin, V.Yu. Blandinsky, V.A. Nevinitisa, P.A. Fomichenko, Yu.N Volkov..... 5

Feasibility study of hybridizing a solar power plant with a small modular reactor for seawater desalination

M.M Saleh, A.A. Abdelrazek, A.F. Mohammed, A.A. Kalyutik, E.A. Sokolova..... 20

Neutron emission from a source moving in a gravitational field

V.Ya. Shpitser, V.V. Krivin..... 31

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

Computational and experimental substantiation of the operability of seals of localizing safety system elements of power units with VVER

S.B. Kravets, S.A. Kuzin, V.M. Sapelnikov, S.E. Sinelshchikova, A.A. Povolotskaya,
V.G. Beketov..... 40

Optimization of software-controlled machining of critical pipe fittings

K.A. Vinnichuk, A.A. Moiseenko, N.N. Podrezov, S.A. Tomilin..... 52

OPERATION OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

Methods and means of ensuring the accuracy of bending deformation measurements of connecting pipe between the VVER reactor and the steam generator in the conditions a fuel campaign

Yu.V. Krasnikov, V.P. Povarov, A.M. Stepanov, S.G. Fish..... 61

Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode of operation

S.S. Pravosud, Ya.O. Yakubov, V.A. Susakin..... 73

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

Staffing of the electric power industry of the Russian Federation under conditions of digital transformation

N.K. Savelyeva, A.A. Sozinova, M.V. Makarova..... 91

Artificial intelligence in teaching technical English to nuclear engineering students

I.V. Zarochintseva, Yu.A. Lupinogina, L.V. Zakharova, O.A. Kikinchuk..... 103

The transformation of the nuclear law of the Russian Federation into an independent public complex branch of law as a way to strengthen global nuclear security in the world

V.T. Kornienko, O.A. Makeeva, E.A. Bragina..... 112

Author Index of 2, 2024..... 121

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

УДК 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-01>

EDN DROWGF

Оригинальная статья / Original paper



О концепции обеспечения ядерной безопасности МТИР-СКД

А.С. Лапин  , В.Ю. Бландинский , В.А. Невиница,
П.А. Фомиченко, Ю.Н. Волков 

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

 Lapin_AS@nrcki.ru

Аннотация. Реактор МТИР-СКД является исследовательским реактором с легководным теплоносителем, имеющим в номинальном режиме работы быстрый спектр нейтронов. Совокупность данных особенностей не имеет ни один из действующих или проектируемых реакторов, поэтому выбору конструкции органов регулирования и их расположению должно уделяться особое внимание. В статье рассматриваются различные конструкции органов регулирования, характерные для разрабатываемого в настоящее время энергетического реактора ВВЭР-СКД, а также действующих исследовательских реакторов с жидкометаллическим теплоносителем, имеющих быстрый спектр нейтронов с учетом особенностей МТИР-СКД: семипэльная конструкция сборки СУЗ, а также пэл кольцевого типа. Для каждой из рассматриваемых конструкций проведены расчеты эффективности и определено, что наибольшей удельной эффективностью обладает конструкция органа регулирования с кольцевым типом пэл. Данная конструкция выбрана основной для реактора МТИР-СКД. Предложены критерии и проведена оптимизация размещения органов регулирования в активной зоне реактора с целью снижения неопределенности получения нейтронно-физических характеристик в центральном автономном петлевом канале и повышению плотности потока в нем. При оптимизации размещения регулирующих органов в исследовательском реакторе учитывалось их влияние на основные нейтронно-физические характеристики, а особенно на их распределение во время работы в номинальных условиях. Аварийная защита и компенсирующие стержни, которые компенсируют температурные и плотностные эффекты при выходе реактора на номинальный уровень мощности извлечены, поэтому их влияние на нейтронно-физические характеристики реактора и петлевого канала во время работы на мощности не существенны, а компенсирующие стержни находятся в активной зоне и выводятся по мере выгорания топлива, поэтому их влияние на пространственное распределение нейтронно-физических характеристик будет существенным. Для снижения этого влияния компенсаторы выгорания и автоматические регуляторы предложено вынести за пределы активной зоны в отражатель. Для различных состояний реактора произведена оценка эффективности ОР СУЗ. Показано, что в различных состояниях органы регулирования переводят реактор на требуемый уровень подкритичности, в соответствии с НП-009-17.

Ключевые слова: МТИР-СКД, сверхкритические параметры теплоносителя, исследовательский реактор, тестовый реактор, органы регулирования.

Благодарность. Авторы благодарят за идею исследования и критические замечания при доработке текста статьи Субботина Станислава Анатольевича, к.т.н., начальника отдела НИЦ «Курчатовский институт» и Седова Алексея Александровича, заместителя руководителя отделения НИЦ «Курчатовский институт»

Для цитирования: Лапин А.С., Бландинский В.Ю., Невиница В.А., Фомиченко П.А., Волков Ю.Н. О концепции обеспечения ядерной безопасности МТИР-СКД. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):5–19. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-01>

For citation: Lapin A.S., Blandinsky V.Yu., Nevinitza V.A., Fomichenko P.A., Volkov Yu.N. MTIR-SCP nuclear safety concept. *Global nuclear safety*. 2024;15(2):5–19 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-01>

MTIR-SCP nuclear safety concept

Anton S. Lapin  , **Viktor Y. Blandinsky** , **Vladimir A. Nevinitza**, **Pyotr A. Fomichenko**,
Yury N. Volkov 

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

 *Lapin_AS@nrcki.ru*

Abstract. The MTIR-SCP reactor is a research reactor with a light-water coolant having a fast neutron spectrum in nominal operation. None of the existing or projected reactors has a set of these features, therefore, special attention should be paid to the choice of the design of control rods and their location. The article considers various designs of control rods characteristic of the VVER-SCP power reactor currently under development, as well as existing research reactors with a liquid metal coolant having a fast neutron spectrum, taking into account the features of the MTIR-SCP: a seven-element control rod assembly design, as well as a ring-type absorbing element. Efficiency calculations are carried out for each of the structures under consideration and it was determined that the design of a control rod with an annular type of absorbing element has the highest specific efficiency. This design is chosen as the main one for the MTIR-SCP reactor. Criteria are proposed and optimization of the placement of control rods in the reactor core is carried out in order to reduce the uncertainty of obtaining neutron-physical characteristics in the central autonomous loop channel and increase the flow density in it. When optimizing the placement of control rods in the research reactor, their influence on the main neutron-physical characteristics, and especially on their distribution during operation under nominal conditions, is taken into account. Emergency protection and compensating rods that compensate for temperature and density effects when the reactor reaches the nominal power level have been removed, therefore their effect on the neutron-physical characteristics of the reactor and the loop channel during operation at power is not significant, and the compensating rods are located in the core and are removed as the fuel burns out, therefore their effect on the spatial The distribution of neutron-physical characteristics will be significant. To reduce this effect, burnout compensators and automatic regulators are proposed to be moved outside the core into the reflector. For various reactor conditions, the efficiency of the control and protection system was evaluated. It is shown that in various states, the control rods transfer the reactor to the required level of subcriticality, in accordance with NP-009-17.

Keywords: MTIR-SCP, supercritical parameters of the coolant, research reactor, test reactor, regulatory authorities.

Acknowledgment. The authors would like to express their gratitude to Stanislav Anatolievich Subbotin, Cand. Sci. (Engin.), Head of Department of SRC «Kurchatov Institute» and Alexey Alexandrovich Sedov, Deputy Head of Department of SRC "Kurchatov Institute" for the idea of the study and critical comments during the revision of the text of the article.

Введение

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается концепция ядерной энергетической установки на базе реактора ВВЭР-СКД [1]. В ходе проведенных работ определены задачи, требующие решения перед началом проектирования такого реактора. При создании инновационных ядерных энергетических установок возникает необходимость рассмотрения не только номинальных технологических процессов,

но и проектных и запроектных аварий, что не только усложняет и удорожает структуру и конструкцию, но и выдвигает проблему научного обоснования возможности решения нового класса научно-технических задач с привлечением новой экспериментальной базы и расчетного инструмента. При этом объем усилий, связанный с созданием и обоснованием систем безопасности становится соизмеримым с созданием систем нормальной эксплуатации. Анализ возмож-

ности использования отечественной экспериментальной базы для решения задач направления ВВЭР-СКД [2-4] показывает необходимость создания исследовательской ядерной установки (ИЯУ) МТИР-СКД [5].

Требованием, предъявляемым к ИЯУ МТИР-СКД является широкий исследовательский функционал. Конструкция реактора предусматривает размещение облучательных каналов как в активной зоне, так и вместо кассет сменного отражателя реактора. Кроме того, предполагается размещение двух автономных петлевых каналов в центре и на периферии активной зоны, в которых могут облучаться экспериментальные сборки с различными видами топлива и конструкционных материалов, с различной температурой входа легководного теплоносителя (от 250 до 450 °С) и, следовательно, с возможностью изменения его входной плотности (от 800 до 100 кг/м³, соответственно), обеспечивая изменение спектра нейтронов в экспериментальной ТВС от теплового до быстрого.

Важным элементом конструкции реактора являются исполнительные органы системы управления и защиты (СУЗ), целью которых является обеспечение безопасной эксплуатации реактора в различных режимах его работы, а также компенсация эффектов, связанных с изменением температур, плотности теплоносителя и изменения нуклидного состава в процессе выгорания.

МТИР-СКД, как и энергетический реактор ВВЭР-СКД, являются уникальными, поскольку охлаждаются легководным теплоносителем низкой плотности с применением

тесной решетки ТВЭлов, что обеспечивает быстрый спектр нейтронов в активной зоне в режиме нормальной эксплуатации. При этом при переходе реактора в состояние длительного останова, в активной зоне реализуется тепловой спектр нейтронов, что приводит к существенному изменению эффективности поглощения в органах регулирования СУЗ. Эту особенность необходимо учитывать при выборе эффективности ОР СУЗ

Поскольку МТИР-СКД – исследовательский реактор, то при выборе компоновки его активной зоны необходимо учитывать то, что в процессе эксплуатации возможно изменение количества ТВС за счет уменьшения или увеличения количества сборок отражателя. Кроме того, возможно изменение состава топлива, а также конструкции ТВС. При этом положение органов регулирования при различных изменениях компоновки активной зоны изменить трудно. Поэтому выбору их размещения с учетом различных условий эксплуатации МТИР-СКД должно уделяться большое внимание уже на стадии проектирования [6].

В данной статье изложены результаты расчетных исследований при выборе конструкции органов регулирования реактора и их размещении в активной зоне.

2 Методы

2.1 Рассмотренные конструкции органа регулирования

Были рассмотрены три конструкции органов регулирования для реактора МТИР СКД (рис. 1).

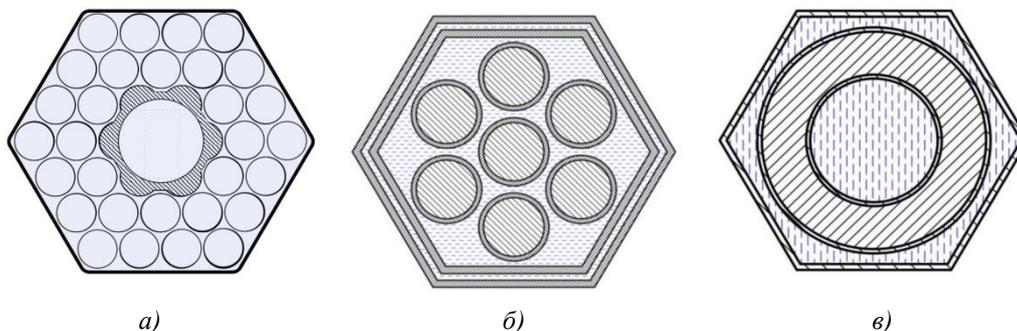


Рисунок 1. Рассмотренные конструкции органов регулирования реактора МТИР-СКД:
а) центральный канал в ТВС; б) поглощающая сборка; в) кольцевой поглощающий элемент

Figure 1. The considered designs of the MIR-SKD reactor control rods:
a) the central channel in the fuel assembly; b) the absorbing assembly; c) the annular absorbing element

Конструкция центрального канала в ТВС схожа с конструкцией канала под орган регулирования энергетического реактора ВВЭР-СКД. В данной конструкции в части ТВС на месте семи центральных твэлов размещается канал сложной формы, в котором расположен орган регулирования. Такая конструкция позволяет получить наиболее низкие градиенты энерговыделения в пределах ТВС.

Альтернативным способом размещения поглощающих элементов внутри реактора является использование поглощающей кассеты, в которой будут присутствовать только неделящиеся материалы, т.е. будет отсутствовать топливо. Такая кассета имеет такие же внешние размеры (размер под ключ – 5,94 см), как и ТВС активной зоны. Поглощающая сборка имеет чехол толщиной 1,5 мм. Внутри этого чехла расположена подвижная часть кассеты, имеющая шестигранную форму с размером под ключ 5,44 см. Подвижная часть окружена чехлом толщиной 1,5 мм. Между чехлом ТВС и чехлом подвижной части имеется зазор в 1 мм, заполненный теплоносителем. Внутри чехла расположены поглощающие элементы с относительным шагом размещения 1.16. Рассматривается вариант с размещением 7 поглощающих элементов в одной кассете. Каждый пэл имеет оболочку толщиной 1 мм.

Третий вариант конструкции – кольцевой поглощающий элемент, который имеет внешние размеры, такие же, как и ТВС активной зоны реактора. Внутренний радиус чехла ТВС составляет 30,5 мм. Поглощающий элемент имеет форму кольца, внутри и снаружи окруженный оболочкой толщиной 1 мм. Внутренний радиус пэла составляет 17 мм, внешний – 26,8 мм. Зазор между пэлом и чехлом сборки составляет 2 мм. Размеры кольца из карбида бора выбраны исходя из равенства объемов поглотителя с предыдущим вариантом из семи поглощающих элементов.

Во всех рассмотренных случаях в качестве поглотителя систем аварийной защиты и компенсации реактивности используется карбид бора с обогащением 80 %. В сборках автоматического регулятора используется

карбид бора с природным содержанием (19,8%).

2.2 Методика оптимизации размещения органов регулирования

С одной стороны, реактор МТИР-СКД является тестовым реактором для подтверждения основных положений, закладываемых при проектировании реактора ВВЭР-СКД, поэтому целесообразно иметь в активной зоне органы регулирования, конструкция которых схожа с ОР СУЗ энергетического реактора. С другой стороны МТИР-СКД – исследовательский реактор, а значит, конструкция органов регулирования должна позволять вносить изменения в компоновку активной зоны, а также учитывать особенности данного реактора.

В центре активной зоны предполагается размещение автономного петлевого канала. Основной задачей данного петлевого устройства является проведение облучения топливных и нетопливных материалов при различной температуре и различном спектре нейтронов, что будет достигаться подачей на вход в канал воды различной плотности, температуры и давления. Для достаточно быстрого набора необходимого флюенса необходимо иметь высокую плотность потока нейтронов внутри петлевого канала. Стоит учитывать, что размещение в непосредственной близости к каналу органов регулирования приведет к снижению плотности потока в петлевом устройстве, а также может приводить к высокой неопределенности прогнозирования и последующего моделирования нейтронно-физических характеристик в петлевом канале.

Необходимо учитывать, что в центральной части активной зоны, где плотность потока наибольшая, предполагается размещение ампульных и экспериментальных устройств. По этой причине необходимо, чтобы нейтронно-физические характеристики были стабильны во время микрокампаний и обеспечивали максимально возможную скорость набора флюенса нейтронов и повреждающей дозы. Стержни аварийной защиты и стержни, компенсирующие температурные и плотностные эффекты при выходе реактора на номинальный уровень мощно-

сти, полностью извлекаются из активной зоны и не оказывают существенного влияния на номинальные нейтронно-физические характеристики. С другой стороны, необходимо обеспечить высокую эффективность этих групп стержней, что может быть достигнуто за счет их размещения в центральной части активной зоны на некотором удалении от центрального петлевого канала.

Стержни, компенсирующие запас реактивности на выгорание, в начале микрокампании находятся в активной зоне и выводятся по мере выгорания топлива и падения реактивности, поэтому их влияние на распределение нейтронно-физических характеристик будет существенным. Это касается и автоматических регуляторов. Поэтому они должны располагаться на периферии активной зоны.

2.3 Используемые программные комплексы

Представленные в данной работе результаты расчетных исследований получены при использовании программного комплекса MCNP5¹ и библиотеки ядерных данных, сформированной на базе стандартных ENDF/B-VII.0 - файлов (Evaluated Nuclear Data File B-VII.0). Код MCNP-5 предназначен для совместного моделирования переноса различного вида частиц (нейтронов, фотонов, электронов). Неоднородные (а для нейтронов и однородные) уравнения переноса излучений решаются аналоговыми и неаналоговыми методами Монте-Карло с использованием нейтронных данных, содержащихся в библиотеках оцененных ядерных данных или полученных на их основе. Геометрический модуль позволяет описывать, практически без упрощений, любые системы в трехмерной геометрии. Это неоспоримое преимущество данного кода.

Расчет выгорания ядерного топлива проводился с помощью ПС ISTAR² – программ-

ной системы моделирования изотопной кинетики в реакторных расчетах с использованием прецизионного кода MCNP5. Задача кинетики нуклидного состава сводится к решению линейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, матрица которой содержит вероятности все процессы для всех нуклидов. Необходимые параметры взаимодействия нуклидов с нейтронами и величины усредненных потоков нейтронов рассчитываются внешним кодом MCNP5, не входящими в ПС ISTAR.

3 Результаты

3.1 Выбор конструкции ОР СУЗ МТИР-СКД

Произведен выбор конструкции штатного органа регулирования реактора МТИР-СКД. Конструкция центрального поглощающего канала в ТВС является неоптимальной для исследовательского реактора, поскольку из-за малого размера «под ключ» ТВС реактора и наличия петлевых каналов, оснащенных системами компенсации давлений между основным и страховочным корпусом петлевого устройства и каналом для измерительной аппаратуры, а также наличием в активной зоне облучательных и ампульных устройств почти в 10% сборок размещение органов регулирования невозможно. По этой причине для обеспечения требуемого уровня подкритичности необходимо разместить органы регулирования такого типа практически во всех ТВС, где это конструктивно возможно. В результате не удается получить достаточную область в центре активной зоны с постоянными нейтронно-физическими характеристиками, что приводит к большим неопределённым при проведении экспериментов.

При использовании семипэльной конструкции и кольцевого поглощающего элемента особое внимание уделялось неравномерности энерговыделения в соседних с по-

¹ MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-03-1987, 2003.

² Дудников А.А. Программа моделирования изотопной кинетики в многокомпонентных структурах

ядерной энергетики «ISTAR» / Свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ, рег. № 2020619218 от 13.08.2020. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=chwohw> (дата обращения: 30.05.2024)

глошающей кассетой ТВС, поскольку при полностью выведенном поглотителе кассета на уровне активной зоны заполняется большим количеством теплоносителя с высокой плотностью, что приводит к затеплению спектра в прилегающих к каналу твэлах и росту энерговыделения в них, что в свою очередь приводит к существенному росту температуры топлива. Рост локального энерговыделения по сравнению со средним в активной зоне составляет более 60%. Для решения данной проблемы предложено разместить в поглощающих стержнях ниже уров-

ня поглотителя (карбида бора) полые цилиндрические стержни-вытеснители для сохранения доли теплоносителя даже при поднятых органах регулирования на номинальном уровне. Вытеснители являются продолжением органов регулирования, имеют такой же внешний диаметр. На рисунке 2 представлено относительное энерговыделение в твэлах ТВС, прилегающей к органу регулирования. В рассмотренном случае орган регулирования выведен из активной зоны. Относительные величины даны в сравнении со средним энерговыделением в активной зоне.

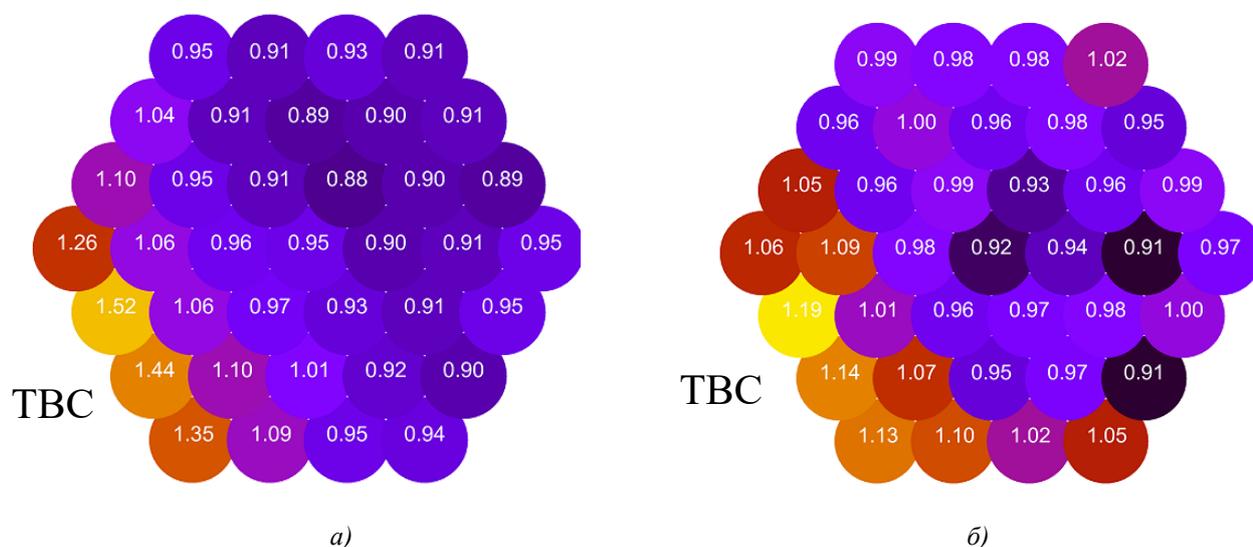


Рисунок 2. Относительное энерговыделение в твэлах соседней с органом регулирования ТВС:

а) без вытеснителя; б) с наличием вытеснителя

Figure 2. Relative energy release in fuel rods of a fuel assembly adjacent to the control rod:
a) without a displacer; b) with the presence of a displacer

Произведено сравнение двух конструкций поглощающих сборок – семипэльной и кольцевой. Оценка максимальной мощности

сборок для обоих вариантов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Мощность поглощающей сборки

Table 1. The power of the absorbing assembly

	Максимальная мощность, кВт	Объем поглотителя, л	Энергонапряженность, кВт/л
Семи пэльный ОР СУЗ	54,3	0,98	54,8
Кольцевой ОР СУЗ	57,8	0,98	58,4

Произведен расчет эффективности органов регулирования реактора МТИР-СКД с кольцевыми органами регулирования и произведено сравнение с семипэльной кон-

струкцией. Значения эффективности органов регулирования в зависимости от плотности теплоносителя приведены на рисунке 3.

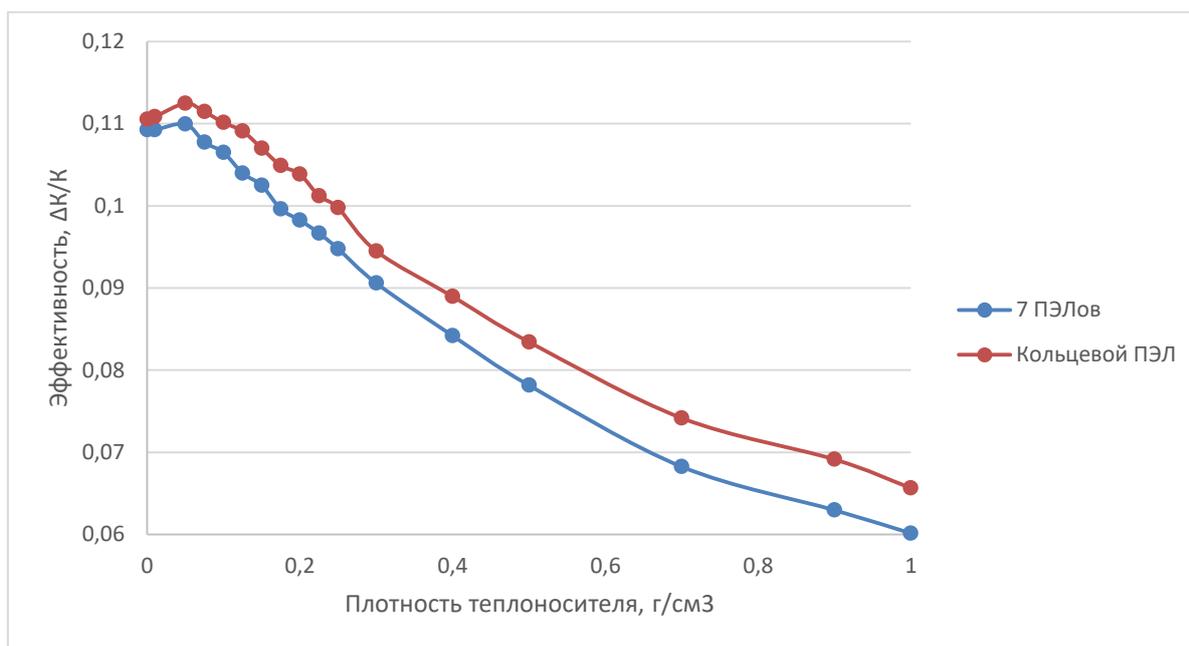


Рисунок 3. Эффективность органов регулирования с семипэльной и кольцевой конструкциями
Figure 3. Efficiency of regulatory bodies with seven-element and ring structures

Как видно из полученных результатов, при равенстве объемов карбида бора эффективность в быстрой области при плотности теплоносителя $<0.1 \text{ г/см}^3$ отличается менее чем на 1%. Для рабочих плотностей теплоносителя отличия составляют порядка 4%. Наибольшее увеличение отличия эффективности наблюдается для состояния с плотностью теплоносителя 1 г/см^3 , которое составляет 9,5%. Также стоит отметить, что для варианта с кольцевым поглощающим элементом возможно дальнейшее увеличение эффективности при выбранном обогащении бора. Возможно размещение цилиндрического пэла во внутреннюю полость кольцевого поглощающего элемента, что увеличит загрузку поглощающего материала.

Из-за невысокого сечения поглощения нейтронов в естественном боре (содержание ^{10}B ~19,8%) в «жестком» спектре нейтронов приходится использовать высокообогащенный по изотопу ^{10}B карбид бора. Высокообогащенный бор дорогой продукт и массово не производится в России. Высокая

удельная загрузка изотопа ^{10}B ведет к существенным локальным неравномерностям нейтронно-физических характеристик в активной зоне и поглотителе, а также к термомеханическим нагрузкам (высокое удельное энерговыделение, распухание, газообразование). Однако даже применение высокообогащенного бора не обеспечивает высокой эффективности РО СУЗ, а увеличение их числа существенно ухудшает физические и экономические параметры исследовательского реактора. Для повышения экономичности (увеличение продолжительности микрокампании, глубины выгорания ЯТ и эффективности использования B_4C) и безопасности реакторов с быстрым спектром необходимо увеличение эффективности РО СУЗ.

В качестве одного из вариантов было рассмотрено использование B_4C не с высоким, а с повышенным обогащением по изотопу ^{10}B . На рисунке 4 приведена зависимость относительной эффективности РО СУЗ для реактора МТИР-СКД от величины обогащения бора по изотопу ^{10}B .

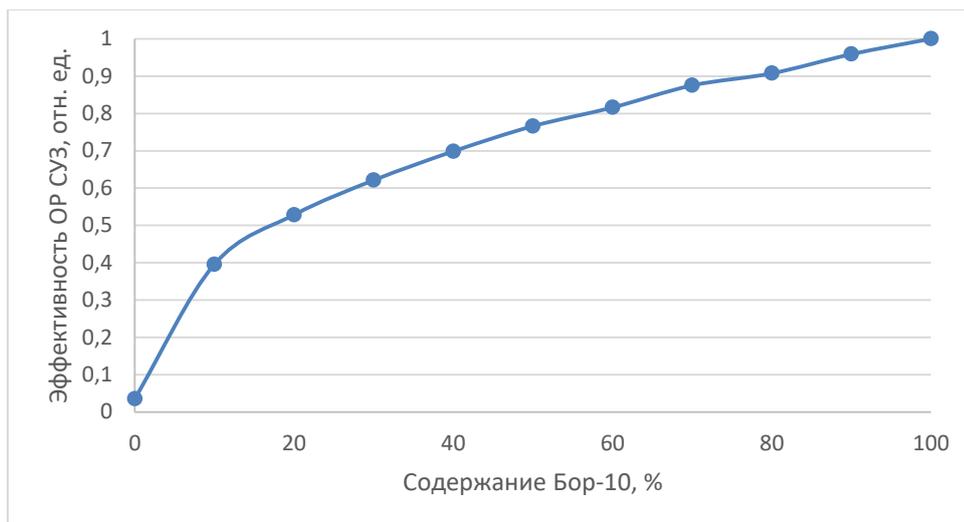


Рисунок 4. Эффективность РО СУЗ в зависимости от обогащения бора по ^{10}B
Figure 4. The efficiency of the RO control rods depends on the enrichment of boron by ^{10}B

Из рисунка видно, что возможность повышения эффективности за счет увеличения обогащения по ^{10}B ограничена. Кроме того, дальнейшее (выше 80%) повышение обогащения существенно повышает его стоимость. Можно повысить эффективность органа регулирования за счет увеличения загрузки поглотителя в РО СУЗ. Наиболее приемлемой для этого является конструкция органа регулирования кольцевого типа. Уве-

личение эффективности в диапазоне рабочих температур и плотностей теплоносителя можно добиться путем увеличения толщины поглощающего кольца из карбида бора. Для понимания зависимости эффективности органа регулирования от толщины поглотителя и оценки влияния экранировки произведена серия расчетов, результаты которых представлены на рисунке 5.

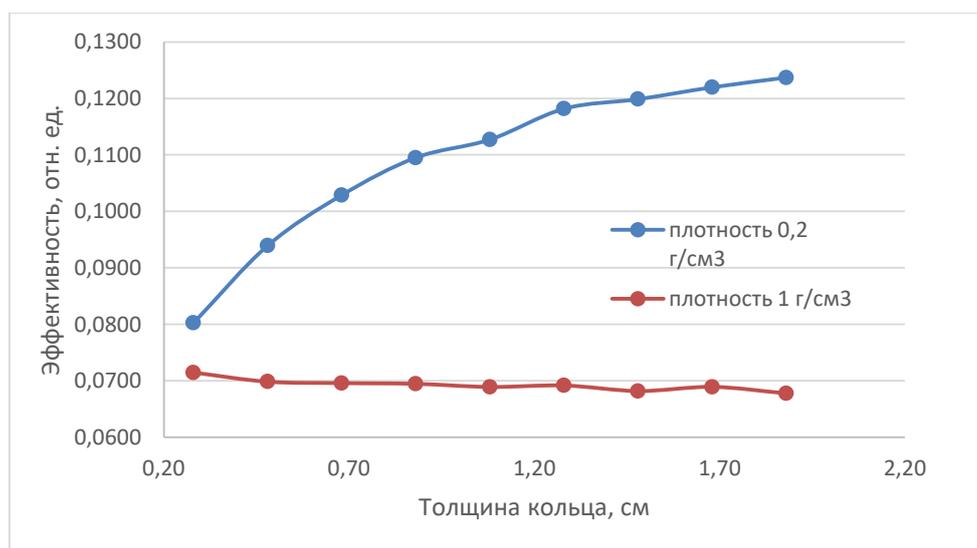


Рисунок 5. Эффективность органов регулирования при различной толщине кольцевого поглотителя (B_4C)

Figure 5. The effectiveness of control rods with different thickness of the annular absorber (B_4C)

Исходя из приведенных выше зависимостей можно сделать вывод, что повышения эффективности можно достичь путем увели-

чения толщины кольца или же при размещении в центре кольцевого поглотителя поглощающего стержня из карбида бора.

Для всех дальнейших расчетов выбрана толщина кольцевого поглотителя, равная 17,6 мм, что соответствует объему карбида бора для семипзельного поглотителя. В случае необходимости увеличения эффективности ОР СУЗ возможно увеличение толщины кольца.

3.2 Оптимизация размещения ОР СУЗ

Для определения оптимального положения стержней аварийной защиты проведена серия расчетов по различному размещению ОР СУЗ в активной зоне. Под оптимальным положением понимается картограмма, при которой достигается наибольшая плотность потока нейтронов в центральном петлевом

канале и максимальная эффективность органов аварийной защиты. В связи с тем, что в центральном канале могут находиться как топливные, так и не топливные материалы, то эффективность аварийной защиты от этого может меняться. Рассмотрен вариант, когда в центральном канале расположена сборка со стальными стержнями. Произведен расчет эффективности трех органов регулирования с содержанием изотопа В¹⁰ 80 % в различных положения симметрично центра (рис. 6), а также нормированной на максимальное значение плотности потока нейтронов на оболочке стального стержня в центральном канале (рис. 7).

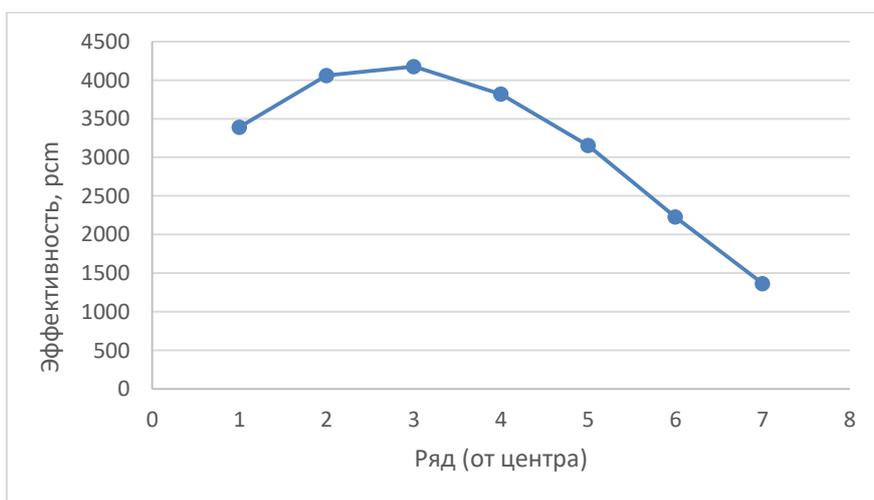


Рисунок 6. Эффективность трех органов регулирования при различном расположении в активной зоне

Figure 6. The effectiveness of the three control rods at different locations in the core

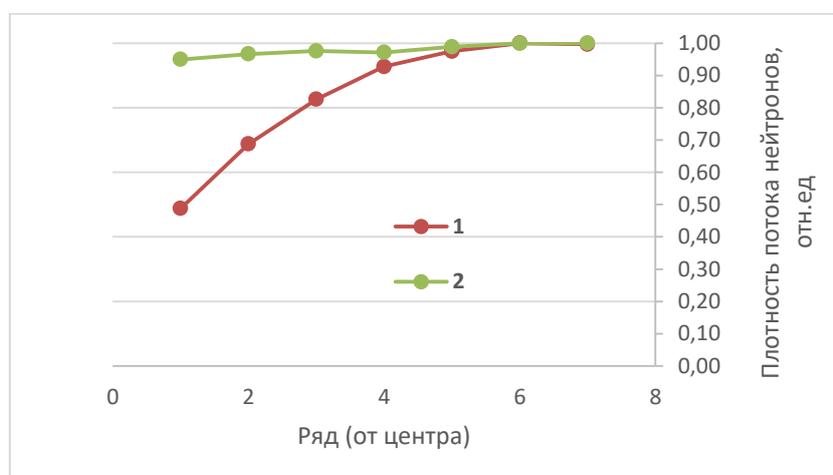


Рисунок 7. Плотность потока нейтронов в центральном петлевом канале: 1 – при опущенных органах регулирования; 2 – при поднятых органах регулирования

Figure 7. Neutron flux density in the central loop channel: 1 – with lowered control rods; 2 – with raised control rods

Как видно из полученных результатов, при размещении органов регулирования аварийной защиты в непосредственной близости к центральному каналу, в котором размещены нетопливные материалы их эффективность значительно ниже, чем при размещении в небольшом удалении. Сильное снижение эффективности происходит и при размещении органов регулирования на границе активной зоны. Поэтому с точки зрения максимальной эффективности наилучшим вариантом является размещения аварийной защиты в 4 ряду от центрального канала.

С точки зрения плотности потока нейтронов в центральном канале нужно отметить, что при опущенных стержнях аварийной защиты нет необходимости иметь высокие

значения плотности потока нейтронов. При поднятых стержнях существенного влияния на плотность потока они не оказывают.

Таким образом, стержни аварийной защиты и компенсаторы температурных и плотностных эффектов, т.е. те, которые при работе реактора на номинальном уровне мощности выведены из активной зоны, целесообразно разместить в 4 ряду от центрального канала.

Исходя из полученных результатов и основных требований, предъявляемым к органам регулирования МТИР-СКД, а также предъявляемым к исследовательским реакторам в целом, предложена картограмма размещения органов регулирования (рис. 8).

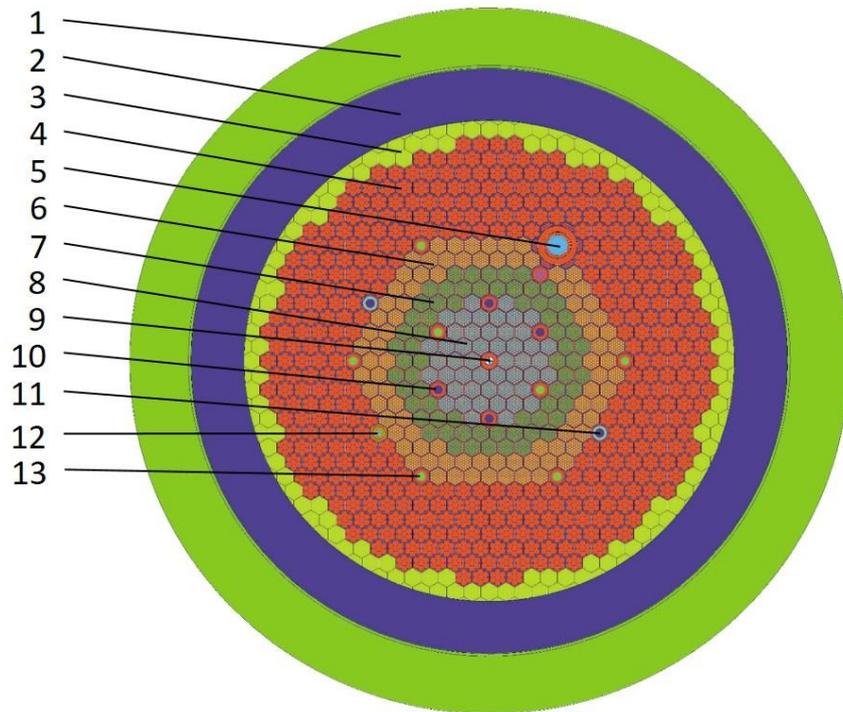


Рисунок 8. Картограмма реактора: 1 – Корпус реактора; 2 – Теплоноситель в опускном участке; 3 – Шахта и выгородка; 4 – Кассеты заменяемого отражателя; 5 – ОУ периферийной автономной петли; 6 – ТВС зоны большого содержания плутония; 7 – ТВС зоны среднего содержания плутония; 8 – ТВС зоны малого содержания плутония; 9 – ОУ центральной автономной петли; 10 – Каналы стержней аварийной защиты; 11 – Кассеты со стержнями автоматического регулирования; 12 – Ампульное устройство; 13 – Кассеты с компенсирующими стержнями

Figure 8. Reactor cartogram: 1 – Reactor vessel; 2 – Coolant in the lowering section; 3 – Shaft and enclosure; 4 – Cartridges of the replaceable reflector; 5 – Peripheral autonomous loop; 6 – Fuel assemblies of the zone of high plutonium content; 7 – Fuel assemblies of the zone of medium plutonium content; 8 – Fuel assemblies of the zone of low plutonium content; 9 – Central autonomous loop; 10 – Channels of emergency protection rods; 11 – Cartridges with automatic control rods; 12 – Ampoule device; 13 – Cartridges with compensating rods

3.2 Эффективность ОР СУЗ

В соответствии с «Правилами ядерной безопасности исследовательских реакторов» (НП-009-17) используемые в реакторе решения должны обеспечивать:

– подкритичность реактора после взвода РО АЗ - не менее 1% ($K_{эфф} \leq 0,99$) на любой момент кампании реактора;

– подкритичность реактора при введенных всех РО СУЗ - не менее 2% ($K_{эфф} \leq 0,98$) на любой момент кампании реактора;

– подкритичность реактора в режиме длительного останова (при введенных всех РО СУЗ и использовании других технических средств воздействия на реактивность или частичной выгрузки ядерного топлива из активной зоны) – не менее 5% ($K_{эфф} \leq 0,95$).

Кроме этого, эффективность РО АЗ без учета одного наиболее эффективного РО АЗ (группы РО АЗ) и их быстроедействие должны обеспечивать:

– приведение реактора в подкритическое состояние и поддержание его в этом состоянии в течение времени, достаточного для введения (срабатывания) других более медленных РО СУЗ.

Поскольку органы регулирования должны переводить реактор на определенный уровень подкритичности в любом состоянии, рассмотрены следующие возможные варианты различных плотностей теплоносителя и температур:

Состояние 1 – Номинальные значения температуры топлива, теплоносителя и конструкционных материалов; номинальные значения плотности теплоносителя;

Состояние 2 – Температура всех материалов 700 К, плотность теплоносителя соответствует номинальному режиму работы;

Состояние 3 – Плотность теплоносителя 1 г/см³, температура всех материалов 300 К.

Произведен расчет эффектов реактивности на начало микрокампании, которые должны быть скомпенсированы органами регулирования СУЗ (табл. 2).

Таблица 2. Эффекты реактивности

Table 2. Reactivity effects

Название эффекта	Значение эффекта, pcm
Плотностной эффект	-1333
Температурный эффект	2065
Суммарный плотностной и температурный эффекты	929
Запас критичности на выгорание	991

Таким образом, плотностной эффект имеет отрицательный знак, а температурный эффект – положительный. Суммарный эффект положительный и составляет 929 pcm.

Оценен вес различных групп стержней для различных состояний реактора (табл. 3).

Таблица 3. Эффективность органов регулирования по группам, pcm

Table 3. Effectiveness of control rods by groups, pcm

	Состояние 1	Состояние 2	Состояние 3
АР	315	93	296
КС температурный	2676	1350	2743
КС выгорание	1293	403	1256
АЗ	5303	2652	5446
АР+КС	4375	1908	4428
АР+КС+АЗ	10405	4982	10629

Выбранное количество органов регулирования по группам позволяет переводить реактор на требуемый согласно НП-009-17

уровень подкритичности в любом состоянии (рис. 9).

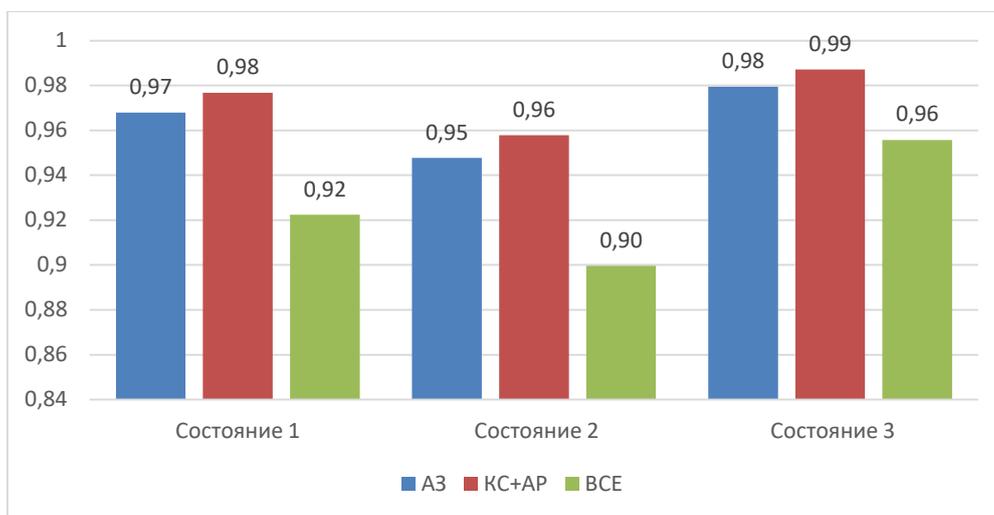


Рисунок 9. Значения $K_{эфф}$ для различных состояний реактора при введенных органах регулирования
Figure 9. K_{eff} values for various reactor states with introduced control rods

Как видно из полученных значений подкритичности, все требования, предъявляемые к органам регулирования выполняются. Стержни аварийной защиты без одного самого эффективного переводят реактор в подкритическое состояние. Компенсирующие ОР СУЗ компенсируют температурный и плотностной эффекты в любом состоянии реактора и вместе со стержнями АР переводят реактор в подкритическое состояние на уровень $K < 0,99$.

Как отмечалось ранее, эффективность ОР СУЗ кольцевого типа может быть повышена путем размещения дополнительного поглотителя внутри ПЭЛ.

4 Обеспечение ядерной безопасности в аварийных процессах

Система управления аварийной защитой является стандартной для современных АС с РУ ВВЭР, также она используется для управления реактором в режимах нормальной эксплуатации, поэтому её применение целесообразно и для ИЯУ МТИР-СКД. На последующих стадиях проектирования необходимо определить конструктивные и количественные характеристики системы, с учётом выбранных режимов функционирования и степени резервирования с участием разработчика реакторной установки.

В частности, система аварийного ввода поглотителя (бора) необходимой концентрации обеспечивает резервирование системы управления аварийной защиты. Использование этой системы приведет к удорожанию блока. Однако отсутствие в проекте системы аварийного ввода поглотителя может негативно сказаться на безопасности и требует расчётного обоснования на последующих стадиях проектирования.

В случае наличия системы аварийного ввода бора потребуется предусмотреть систему его вывода из теплоносителя после завершения аварийного процесса. Возможными вариантами являются:

- система очистки, которая снизит его концентрацию до минимально возможного уровня, позволяющего перевести реактор в режим нормальной эксплуатации. Минусом такого варианта является значительная длительность процесса вывода бора из теплоносителя и необходимость проведения расчётного обоснования значения минимальной концентрации бора в теплоносителе для нормальной работы реактора на всех этапах топливной компании.

- слив теплоносителя первого контура с бором после аварии в специально предусмотренную емкость для последующей его очистки, отмывка первого контура и ТВС от

бора, залив теплоносителя с необходимым ВХР. Минусом такого варианта является необходимость предусматривать специальные баки хранения теплоносителя с бором большой емкости, которые во время эксплуатации могут так и не использоваться.

В случае применения в проекте МТИР-СКД системы аварийного ввода бора применение данной систем потребует определить конструктивные и количественные характеристики системы, с учётом выбранных режимов функционирования и степени резервирования. Также предлагается рассмотреть возможность применения системы аварийного ввода поглотителя, построенной на пассивном принципе функционирования.

Заключение

Важным элементом, определяющим исследовательский потенциал ИЯУ МТИР-СКД являются органы регулирования СУЗ. Рассмотрены три различные конструкции ОР СУЗ: цилиндрический пэл в центральном канале ТВС, семипэльная сборка и сборка с кольцевым пэл. Исходя из требований, которые сформулированы для МТИР-СКД, оптимальным и обладающим наибольшей удельной эффективностью является пэл кольцевой конструкции. В случае изменения компоновки активной зоны и необходимости повышения эффективности системы управления и защиты его конструкция позволяет разместить дополнительное количество поглотителя в центральную полость кольцевого поглотителя.

Проведена оптимизация размещения органов регулирования СУЗ. Поскольку в МТИР-СКД предполагается размещение центрального петлевого канала, то целесообразно вынести ОР СУЗ из центральной части для увеличения плотности потока нейтронов в ней и снижения возмущений нейтронного поля при проведении облучений.

Как видно из полученных значений эффективности ОР СУЗ, для различных состояний реактора выполняются все требования, предъявляемые к органам регулирования. Стержни аварийной защиты без одного самого эффективного переводят реактор в подкритическое состояние. Компенсирующие ОР СУЗ компенсируют температурный и плотностной эффекты в любом состоянии реактора и вместе со стержнями АР переводят реактор в подкритическое состояние на уровень $K < 0,99$, согласно НП-009-17.

Система управления аварийной защитой является стандартной для современных АЭС с РУ ВВЭР и должна использоваться на ИЯУ МТИР-СКД. Система аварийного ввода бора необходима для обеспечения ядерной безопасности реактора в аварийных процессах. После аварии бор должен быть удален из теплоносителя либо с помощью системы очистки, либо путем слива охлаждающей жидкости в емкость для очистки. Конструкция и характеристики системы должны быть определены с учетом режимов работы и степени резервирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев П.Н., Ковалишин А.А., Седов А.А., Андрианова Е.А. [и др.]. Развитие технологии ВВЭР на базе энергетических реакторов с легководным теплоносителем сверхкритических параметров. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 2023;1:48–63. EDN: EXYEZU. Режим доступа: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2023-01.pdf> (дата обращения: 30.05.24)

Alekseev P.N., Kovalishin A.A., Sedov A.A., Andrianova E.A. [et al]. Development of VVER technology based on power reactors with a light-water coolant of supercritical parameters. *Issues of atomic science and technology. Series: Physics of Nuclear Reactors*. 2023;1:48–63. EDN: EXYEZU. Available at: <http://nrcki.ru/files/pdf/VANT-2023-01.pdf> (accessed: 30.05.24)

2. Внуков Р.А., Котов Я.А., Невиница В.А., Колесов В.В. [и др.]. Оценка возможности получения экспериментальных данных для зон ВВЭР-СКД на стенде БФС. *ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные конструкции*. 2023;1:117–129. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50474933> (дата обращения: 30.05.24)

Vnukov R.A., Kotov Ya.A., Nevinitisa V.A., Kolesov V.V., [et al]. Evaluation of the possibility of obtaining experimental data for VVER-SKD zones at the BFS stand. *VENT. Ser. Nuclear Reactor Constants*. 2023;1:117–129. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50474933> (accessed: 30.05.24)

3. Седов А.А., Поляков П.С., Пустовалов С.Б., Паршин В.В., Симонов С.С. Основные результаты тестовых испытаний замкнутого контура с естественной циркуляцией легководного теплоносителя при сверхкритическом давлении. *Теплоэнергетика*. 2023;3:73–86. <https://doi.org/10.56304/S0040363623030074>

Sedov A.A., Polyakov P.S., Pustovalov S.B., Parshin V.V., Simonov S.S. The main results of test tests of a closed circuit with natural circulation of a light-water coolant at supercritical pressure. *Thermal Power Engineering*. 2023;3:73–86. <https://doi.org/10.56304/S0040363623030074>

4. Бландинский В.Ю., Колесов В.В., Невиница В.А., Фомиченко П.А. [и др.]. Особенности изменения изотопного состава опытных твэлов реактора типа ВВЭР-СКД при последовательном облучении в быстром и тепловом спектре нейтронов. *ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов*. 2022;2:90–96. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50487323> (дата обращения: 30.05.24)

Blandinsky V.Yu., Kolesov V.V., Nevinitisa V.A., Fomichenko P.A. [et al]. peculiarities of changes in the isotopic composition of pilot fuel elements of a VVER-SKD reactor under successive irradiation in the fast and thermal neutron spectrum. *Issues of atomic science and technology. Series: Physics of Nuclear Reactors*. 2022;2:90–96. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50487323> (accessed: 30.05.24)

5. Седов А.А., Бландинский В.Ю., Котов Я.А., Кузенкова Д.С., [и др.]. Концепция ядерной энергетической установки на базе многоцелевого тестового исследовательского реактора малой мощности с легководным теплоносителем сверхкритических параметров. *Теплоэнергетика*. 2023;5:5–22. EDN: GMHDNA. <https://doi.org/10.56304/S0040363623050065>

Sedov A.A., Blandinsky V.Yu., Kotov Ya.A., Kuzenkova D.S. [et al]. The concept of a nuclear power plant based on a multipurpose test research reactor of small capacities with a light-water coolant of supercritical parameters. *Thermal Power Engineering*. 2023;5:5–22. EDN: GMHDNA. <https://doi.org/10.56304/S0040363623050065>

6. Жемков И.Ю. Оптимизация размещения органов СУЗ в исследовательском реакторе на быстрых нейтронах. *Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР*. 2010;1:27–34. EDN YRPSFF. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29319756> (дата обращения: 30.05.24)

Zhemkov I.Yu. Optimization of the placement of CPS organs in a fast neutron research reactor. *Proceedings of JSC SSC NIAR*. 2010;1:27–34. EDN YRPSFF. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29319756> (accessed: 30.05.24)

ВКЛАД АВТОРОВ:

Лапин А.С. – проведение численных расчетов, подготовка текста статьи

Бландинский В.Ю. – постановка задачи, выбор методов исследования

Невиница В.А. – выбор методов исследования

Фомиченко П.А. – общее руководство, выбор методов исследования

Волков Ю.Н. – подготовка текста статьи

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Lapin A.S. – numerical calculations, preparation of the text of the article

Blandinsky V.Yu. – problem statement, choice of research methods

Nevinitisa V.A. – the choice of research methods

Fomichenko P.A. – general guidance, selection of research methods

Volkov Yu.N. – general guidance, preparation of the text of the article

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена при финансовой поддержке АО «Концерн Росэнергоатом»

FUNDING:

The work was carried out with the financial support of Rosenergoatom Concern JSC

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Антон Сергеевич Лапин, лаборант-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9013-4932>
e-mail: Lapin_AS@nrcki.ru

Виктор Юрьевич Бландинский, кандидат технических наук, ученый секретарь НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9667-1000>
e-mail: Blandinskiy_VY@nrcki.ru

Владимир Анатольевич Невиница, кандидат технических наук, руководитель отделения, г. Москва, Российская Федерация.
e-mail: Neviniza_VA@nrcki.ru

Петр Анатольевич Фомиченко, заместитель руководителя комплекса, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.
e-mail: Fomichenko_PA@nrcki.ru

Юрий Николаевич Волков, кандидат технических наук, ведущий эксперт, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3954-6639>
e-mail: YNVolkov@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Anton S. Lapin, research assistant, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9013-4932>
e-mail: Lapin_AS@nrcki.ru

Viktor Yu. Blandinsky, Cand. Sci. (Engin.), Scientific Secretary, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9667-1000>
e-mail: Blandinskiy_VY@nrcki.ru

Vladimir A. Nevinitsa, Cand. Sci. (Engin.), Head of the Department, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.
e-mail: Neviniza_VA@nrcki.ru

Pyotr A. Fomichenko, Deputy Head of the complex, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.
e-mail: Fomichenko_PA@nrcki.ru

Yury N. Volkov, Cand. Sci. (Engin.), Leading expert, NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3954-6639>
e-mail: YNVolkov@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.04.2024
После доработки 31.05.2024
Принята к публикации 06.06.2024

Received 15.04.2024
Revision 31.05.2024
Accepted 06.06.2024

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

УДК 621.039.5: 620.91: 338.45
<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-02>
EDN FUHC DK

Оригинальная статья / Original paper



Исследование целесообразности сочетания солнечной электростанции с реактором малой мощности для опреснения морской воды

М.М. Салех , А.А. Абдельразек  , А.Ф. Мохаммед ,
А.А. Калютик , Е.А. Соколова 

Высшая школа атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
 abdelrazek.a@edu.spbstu.ru

Аннотация. В статье рассматривается технико-экономический анализ установки по опреснению морской воды. Источником энергии на предлагаемой станции является сочетание солнечной и атомной видов энергии, поскольку они являются одними из наиболее экологически чистых источников энергии по сравнению с электростанциями, работающими на ископаемом топливе. Источником ядерной энергии в данном исследовании является модульный реактор малой мощности (ММР). В состав комбинированной установки входит гибридная система опреснения морской воды: либо сочетание установки обратного осмоса с установкой многоступенчатой дистилляции (RO+MED), либо установка обратного осмоса с установкой дистилляции мгновенным вскипанием (RO+MSF). Реакторы малой мощности можно использовать не только для производства электроэнергии, но и для других, неэлектрических применений, поскольку они производят высокотемпературный пар для промышленных процессов (например, для производства водорода и опреснения морской воды). Реакторы малой мощности также считаются экономически более эффективными, безопасными, более гибкими и имеют большее количество применений по сравнению с реакторами большой мощности. Проводимый в работе анализ основан на расчете экономической стоимости одного кубометра пресной воды при использовании гибридной опреснительной установки и сравнении результатов с результатами, полученными в результате использования опреснительной установки, интегрированной с электростанцией, использующей исключительно ядерную энергию в качестве энергоисточника на базе реактора ВВЭР-1200. Также в данном исследовании рассматривается влияние степени гибридизации, то есть отношения мощности, используемой от солнечной энергии, к мощности, используемой от ядерной энергии, на стоимость опреснения одного кубометра воды, а также на качество опресненной воды.

Ключевые слова: реактор малой мощности, ММР, опреснение морской воды, атомное опреснение, обратный осмос, мгновенное вскипание, многоступенчатая дистилляция, солнечная электростанция, гибридизация энергетических систем, ВВЭР-1200.

Для цитирования: Салех М.М., Абдельразек А.А., Мохаммед А.Ф., Калютик А.А., Соколова Е.А. Исследование целесообразности сочетания солнечной электростанции с реактором малой мощности для опреснения морской воды. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):20–30. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-02>

For citation: Saleh M.M., Abdelrazek A.A., Mohammed A.F., Kalyutik A.A., Sokolova E.A. Feasibility study of hybridizing a solar power plant with a small modular reactor for seawater desalination. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):20–30 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-02>

Feasibility study of hybridizing a solar power plant with a small modular reactor for seawater desalination

Mostafa M. Saleh , Ahmed A. Abdelrazek  , Arafa F. Mohammed ,
Alexander A. Kalyutik , Ekaterina A. Sokolova 

Higher School of Nuclear and Thermal Power Engineering, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg, Russian Federation
 *abdelrazek.a@edu.spbstu.ru*

Abstract. The article discusses the technical and economic analysis of a seawater desalination plant, where the power source is a hybrid of solar and nuclear energy, as they are considered the cleanest energy sources compared to fossil fuel power plants. The source of nuclear energy in this study is a small modular reactor (SMR). This plant also uses a hybrid of seawater desalination systems: either a reverse osmosis plant with a multi-effect distillation (RO + MED) unit, or a reverse osmosis plant with a multi-stage flash distillation (RO + MSF) unit. Small modular reactors can be used for other applications besides generating electricity, as they produce high-temperature steam which can be used in many industrial processes such as hydrogen production and seawater desalination. Small modular reactors are also considered to be more cost effective, safer, more flexible and have a greater number of applications compared to high power reactors. The analysis is based on calculating the cost of producing of one cubic meter of fresh water using this hybrid desalination plant and comparing the results with those of desalination plant integrated with a power plant that uses exclusively nuclear energy as a source of thermal and electrical power, which uses the VVER-1200 reactor. Also, this study studies the impact of the degree of hybridization, that is, the ratio of power used from solar energy to power used from nuclear energy, on the cost of desalination of one cubic meter of water, as well as on the quality of the desalinated water.

Keywords: small modular reactor, SMR, seawater desalination, nuclear desalination, RO, MSF, MED, solar power plant, energy hybridization, VVER-1200.

Введение

Вода – это ограниченный ресурс, спрос на который постоянно растет. По мере роста численности населения Земли и продолжения ресурсоемкого экономического развития во многих странах, водные ресурсы и инфраструктура не могут удовлетворить растущий спрос. Изменение климата усугубляет дефицит воды. Запасы земной воды, представляющие из себя воду, содержащуюся в почве, снегу и льде – уменьшаются. Это приводит к увеличению дефицита воды. Одним из наиболее важных и надежных решений проблемы нехватки воды является опреснение морской воды, но большинство опреснительных установок, существующих в настоящее время в мире, работают на ископаемом топливе, что приводит к негативным экологическим последствиям, таким как глобальное потепление, загрязнение воздуха и изменение климата. В связи с этим необходимо было изучить безопасные и экологически чистые альтернативы, на которые можно положиться для решения этой про-

блемы. Среди этих альтернатив — использование ядерной или солнечной энергии в качестве источника энергии для опреснения морской воды или использование совместной выработки ядерной и солнечной энергии. В данном исследовании изучается экономическая и техническая целесообразность сочетания источников солнечной и ядерной энергии для нужд опреснения морской воды. В рассматриваемой работе источником ядерной энергии служит реактор малой мощности (малый модульный реактор – ММР).

Реакторы малой мощности представляют собой реакторы с электрической мощностью обычно до 300 МВт_{эл}, что составляет около одной трети генерирующих мощностей традиционных ядерных энергетических реакторов¹. ММР разрабатываются для всех ос-

¹ Advances in small modular reactor technology developments, IAEA publications, 2022. Available at: <https://aris.iaea.org/sites/Publications.html> (accessed: 07.03.2024).

новых технологических линий реакторов: водоохлаждаемых реакторов, высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, расплавленносолевых реакторов и микрореакторов. ММР представляют собой низкоуглеродную альтернативу системам производства электроэнергии, работающим на ископаемом топливе, в странах с непротяженными электросетями и ограниченными финансовыми возможностями. ММР могут сыграть ключевую роль в смягчении последствий изменения климата не только из-за их способности снижать выбросы углекислого газа электростанциями благодаря быстрой масштабируемости и распространению дополнительных модулей по мере необходимости, но также из-за их потенциальной пользы для неэлектрических применений, таких как опреснение морской воды, централизованное теплоснабжение и хладоснабжение, а также производство водорода – процессы, которые до сих пор были основаны в основном на ископаемом топливе [1,2].

Поскольку ММР находятся на ранней стадии разработки, крайне важен углубленный анализ необходимости и осуществимости их распространения. По сравнению с АЭС ММР считаются более безопасными, более экономически эффективными, требуют меньших капитальных затрат и имеют более короткие сроки строительства [3], в частности, ММР изготавливаются на заводе, что значительно упрощает транспортировку и сборку и может сократить сроки строительства на месте [4]. Кроме того, реакторы имеют улучшенные системы безопасности, что делает ядерную энергетическую технологию еще более безопасной.

С учетом требований безопасности были предприняты различные меры по улучшению характеристик ММР, такие как меньшие размеры активной зоны, большее отношение поверхности к объему реактора и меньшая удельная мощность активной зоны. В большинстве современных конструкций внутри корпуса реактора нет вращающихся частей; весь теплоноситель протекает через активную зону за счет естественной циркуляции, что позволяет исключить выход из

строения насоса первого контура и тем самым – ремонт или замену насосов [5].

Солнечная энергия может использоваться в качестве источника энергии для опреснения воды, поскольку фотоэлектрическая (PV) технология может быть напрямую подключена к процессам обратного осмоса, которые основаны на использовании электричества в качестве привода (см. рис. 1). Различные небольшие фотоэлектрические системы опреснения были построены в качестве демонстрационных моделей в разных странах мира. Одной из основных причин использования метода обратного осмоса вместо термической дистилляции является надежность и простота прямого объединения с возобновляемыми источниками энергии, такими как солнечная и ветровая энергия. Хоссам-Элдин и др. [6] исследовали сочетание фотоэлектрических и ветровых источников энергии с опреснительной обратноосмотической установкой для производства 1200 м³/сут. Хелал и др. [7] исследовали экономическую целесообразность использования системы PV-RO при низком энергопотреблении. Три альтернативные конструкции независимого блока PV-RO были протестированы в отдаленных районах Объединенных Арабских Эмиратов. Изучалась возможность использования дизель-генераторов в выходные дни.

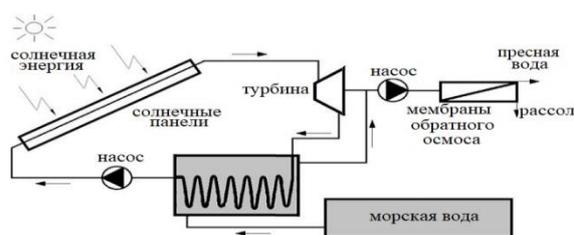


Рисунок 1. Схема подключения солнечной панели в качестве источника энергии к системе обратного осмотического опреснения морской воды

Figure 1. Diagram of connecting a solar panel as an energy source to a seawater desalination system using reverse osmosis

В данном исследовании использовались два типа гибридизации для получения более высокого уровня производства опресненной воды в день, а также для получения более низкой цены за кубический метр. Первый тип – это использование гибридных источников энергии, то есть использование сол-

нечных панелей с ММР, а второй тип – это гибридизация используемого типа опреснения за счет использования систем термического опреснения с системами обратного осмоса. Солнечные панели вырабатывают электроэнергию для насосов установки обратного осмоса, а ММР применяются для выработки пара, который используется для работы установок термического опреснения воды. Целью сочетания энергоисточников

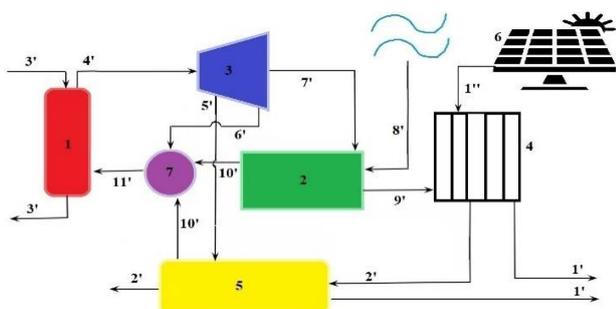


Рисунок 2. Предлагаемая схема гибридной установки опреснения воды: 1 – парогенератор; 2 – конденсатор; 3 – турбина; 4 – мембраны ОО; 5 – установка термического опреснения; 6 – солнечные панели; 7 – подогреватель; 1' – опресненная вода; 2' – рассол; 3' – теплоноситель первого контура реактора; 4' – свежий пар на турбину; 5' – пар на установку термического опреснения; 6' – греющий пар на подогреватель; 7' – отработанный пар; 8' – морская вода; 9' – питательная вода для мембран ОО из конденсатора; 10' – конденсат; 11' – питательная вода; 1'' – электроэнергия для насосов ОО

Figure 2. A proposed diagram of a hybrid water desalination plant. 1 – steam generator; 2 – condenser; 3 – turbine; 4 – RO membranes; 5 – thermal desalination plant; 6 – solar panels; 7 – reheater; 1' – desalinated water; 2' – brine; 3' – the coolant of the reactor's primary circuit; 4' – fresh steam to the turbine; 5' – steam for the thermal desalination plant; 6' – heating steam to the heater; 7' – spent steam; 8' – sea water; 9' – feed water for RO membranes from the condenser; 10' – condensate; 11' – feed water; 1'' – electric power for RO pumps

является получение воды наилучшего качества по оптимальной стоимости, так как метод обратного осмоса обеспечивает производство воды более низкого качества, но с более низкой стоимостью, а методы термического опреснения позволяют получить воду более высокого качества, но с более вы-

сокими затратами. Подобная схема представлена на рисунке 2.

Методология

Основная идея исследования заключается в сочетании двух типов технологии опреснения воды – электрического (обратного осмоса) и термического (метода мгновенного вскипания или многоколонного испарения) Используемые источники энергии также будут гибридизированы. Вместо того, чтобы полностью полагаться на один источник энергии в качестве источника тепловой и электрической энергии, электроэнергия, необходимая для работы насосов опреснительной установки, будет вырабатываться с помощью солнечной электростанции. Малый модульный реактор будет использоваться в качестве источника тепловой энергии для термической опреснительной установки. Установка РО использует воду, поступающую из конденсатора ядерного реактора (малого модульного реактора), чтобы воспользоваться преимуществами высокой температуры нагрева этой воды. Потому что чем выше температура воды, тем быстрее происходит диффузия. По мере ускорения диффузии потребляемая энергия уменьшается. Таким образом рассол, полученный на установке обратного осмоса, станет источником питания для установки термического опреснения. Для определения входной мощности для системы РО [8], скорость подачи воды к мембранам обратного осмоса (РО) может быть выражена следующим уравнением (1):

$$M_f = M_p / RR, \quad (1)$$

где M_f , M_p и RR – расход питательной воды, расход пермеата и коэффициент восстановления соответственно.

Соленость пресной воды (пермеата) выражается следующим уравнением (2):

$$X_p = (K_s \times A_t \times X_{av}) / M_p, \quad (2)$$

где X_p , k_s , A_t и X_{av} – это соленость пермеата, проницаемость для соли, общая площадь

мембраны и средняя соленость, соответственно.

Соленопроницаемость определяется по формуле (3):

$$K_s = 4.72 \times 10^{-7} \times FF \times TCF \times (0.062 - (5.3 \times 10^{-5} \times (T_{sea} + 273))), \quad (3)$$

где FF, TCF, Tsea – коэффициент обрастания мембраны, температурный поправочный коэффициент и температура морской воды, соответственно.

Температурный поправочный коэффициент TCF рассчитывается по формуле (4):

$$TCF = \exp\left(3020 \times \left(\frac{1}{273+T_{sea}} - \frac{1}{298}\right)\right), \quad (4)$$

Расход рассола можно рассчитать по формуле (5):

$$M_c = M_f - M_p, \quad (5)$$

Концентрацию рассола можно определить по формуле (6):

$$X_c = (M_f \times X_f - M_p \times X_p) / M_c, \quad (6)$$

где X_c , X_f – концентрация рассола и исходной соли соответственно.

Водопроницаемость мембраны K_w рассчитывается по формуле (7):

$$K_w = 6.84 \times 10^{-8} \times (18.685 - \left(\frac{0.177X_c}{T_{sea}+273}\right)), \quad (7)$$

Чистая разница давлений на мембране ΔP выражается следующим уравнением (8):

$$\Delta P = M_p / (TCF \times K_w \times FF \times A_e \times N_e \times N_v) + \Delta \pi, \quad (8)$$

где A_e , N_e , N_v и $\Delta \pi$ – площадь мембранного элемента, количество мембранных элементов на сосуд под давлением, количество сосудов под давлением и чистое осмотическое давление на мембране соответственно.

Требуемая потребляемая мощность для насоса высокого давления установки обратного осмоса P_{RO} определяется уравнением (9):

$$P_{RO} = (0.2777 \times M_f \times \Delta P) / (\rho \times \eta_{hpp}), \quad (9)$$

После определения энергии, необходимой для насосов системы обратного осмоса, можно приступить к расчетам солнечной станции (определить количество требуемых солнечных панелей, а также количество аккумуляторов, необходимых для производства этой энергии). Аккумуляторы сохраняют излишки энергии солнца, выработанные фотоэлектрической станцией в дневное время, и используют их вечером. Солнечную радиацию рассчитываем, используя программу «Pvsyst», задав необходимое местоположение. Прежде чем выбрать подходящее место для строительства солнечной электростанции, необходимо учесть многие критерии размещения реактора малой мощности. К ним относятся географические и геологические параметры, поверхностные и подземные воды, зоны отчуждения, транспортные маршруты, социально-экономические и экологические риски.

В качестве примера был выбран участок в городе Эль-Дабаа в провинции Матрух, в Арабской Республике Египет, где вышеупомянутые факторы выбора участка были полностью изучены за последние годы. Известно, что данный участок был выбран для строительства первой египетской атомной электростанции в сотрудничестве с российской Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом». Город Эль-Дабаа расположен в 296 км от Каира на северном побережье Средиземного моря, а в качестве энергоисточника был выбран реактор малой мощности типа БРЕСТ-ОД-300, представленный на рисунке 3. Это надежный реактор российского производства на быстрых нейтронах, со свинцовым теплоносителем и пристанционным топливным циклом.

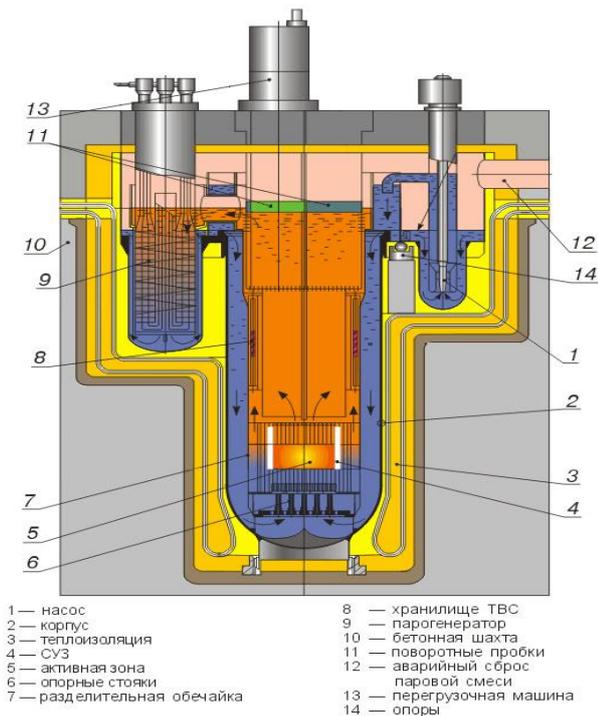


Рисунок 3. Схема реактора БРЕСТ-ОД-300
Figure 3. Schematic design of BREST-OD-300 reactor

Реактор работает на мононитриде урана и плутония (U-Pu)N и использует двухконтурную систему теплопередачи для подачи тепла на паровую турбину. В таблице. 1. приведены технические характеристики реактора БРЕСТ-ОД-300.

Таблица 1. Технические характеристики реактора БРЕСТ-ОД-300

Table 1. Technical characteristics of the BREST-OD-300 reactor

Тип реактора	Быстрый реактор с жидкометаллическим охлаждением
Тепловая мощность	700 МВт
Температура активной зоны на входе/выходе	420/540°C
Эл. мощность	300 МВт
Охлаждающая жидкость	свинец

Результаты и обсуждение

Для оценки производительности фотоэлектрической системы после определения местоположения и нагрузки, было использовано программное обеспечение «PVsyst» [9]. Пользователь выбирает различные компоненты из базы данных программного обеспечения, и оно автоматически рассчитывает

размер системы. В расчетах было выбрано 4655 солнечных панелей типа «Sunnytilr Typ amorph», площадь каждой 533 м², и 444 аккумулятора типа «Wesco GS-100, 105 Ah», расположенные 74 последовательно и 6 параллельно. После выбора и расположения панелей определялась общая стоимость всей солнечной электростанции, а на основе пакета MATLAB была разработана программа для расчета стоимости производства одного кубометра опресненной воды из морской на основе параметров каждого типа опреснения, и с использованием расчетных методов, одобренных Международным Агентством по Атомной Энергии по оценке экономической стоимости установок опреснения морской воды [10] и согласно экономическим данным реактора Брест-од-300 (капитальные затраты, стоимость топлива, стоимость эксплуатации и технического обслуживания) [11].

Стоимость производства одного кубометра опресненной воды сравнивалась при использовании гибридных источников энергии и без использования гибридных источников энергии при коэффициенте восстановления 15% и 50%. Полученные результаты представлены на рисунках 4 и 5.

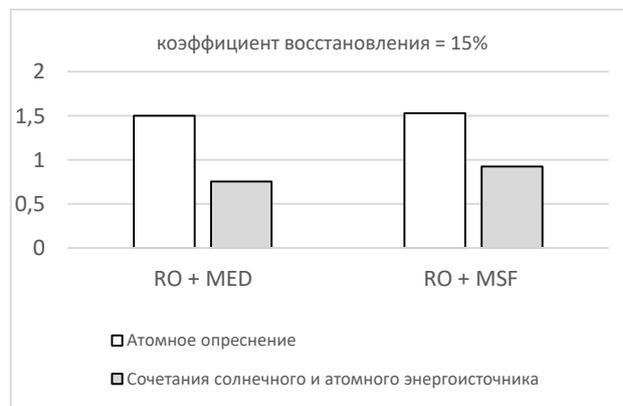


Рисунок 4. Сравнение стоимости производства 1 м³ опреснённой воды с использованием гибридных энергоисточников и без использования сочетания энергоисточников при коэффициенте восстановления 15%

Figure 4. Comparison between the cost of producing one cubic meter of desalinated water using hybrid energy sources and the cost without using hybridization at a recovery factor of 15%

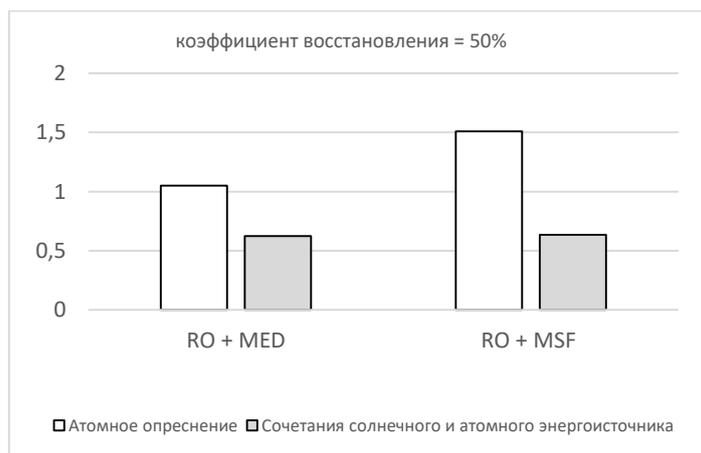


Рисунок 5. Сравнение стоимости производства одного кубометра опреснённой воды с использованием гибридных источников энергии и стоимости без использования сочетания при коэффициенте восстановления 50%

Figure 5. Comparison between the cost of producing one cubic meter of desalinated water using hybrid energy sources and the cost without using hybridization at a recovery factor of 50%.

Сравнение стоимости опреснения с использованием гибридных систем опреснения и без рассматривается на рисунке 6. Сравнение проводилось на основе расчетов опреснительной установки производительностью 100000 м³/сут. Также

сравнивалась стоимость производства воды при использовании двух различных типов гибридных систем опреснения: RO+MSF и RO+MED при коэффициенте восстановления 15% и 50%.

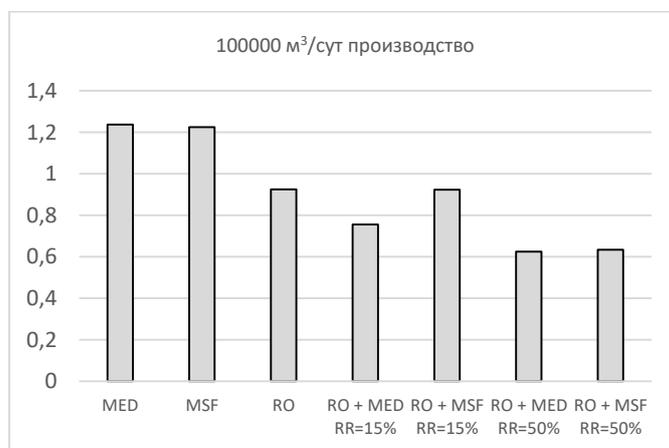


Рисунок 6. Сравнение стоимости кубометра опресненной воды при использовании гибридных систем опреснения и без использования

Figure 6. Comparison of the cost of desalination using hybridization of desalination systems and without using hybridization

Из рисунков 4,5,6 можно прийти к выводу, что для снижения стоимости опреснения воды рекомендуется сочетание энергоисточников, а также использование гибридных систем опреснения (RO+MSF) или (RO+MED).

На рисунке 7 показана зависимость стоимости производства одного кубометра пресной воды от коэффициента восстановления.

Как видно из рисунка, с увеличением коэффициента восстановления стоимость воды снижается, поскольку коэффициент восстановления мембраны обратного осмоса относится к проценту питательной воды, преобразованной в опресненную воду или пермеат в мембранной системе обратного осмоса. Чем выше коэффициент восстановления, тем выше производство опресненной воды мето-

дом обратного осмоса. Следует учесть, что по мере роста коэффициента восстановления соленость воды также увеличивается, как показано на рисунке 8.

Известно, что от солености воды зависит качество опресненной воды, и в зависимости от цели опреснения, определяется допустимый предел солености опресненной воды.

Если целью опреснения является получение питьевой воды, то качество воды должно быть высоким и стоимость опреснения увеличивается, а для промышленных и сельскохозяйственных целей соленость опресненной воды выше, но стоимость опреснения меньше.

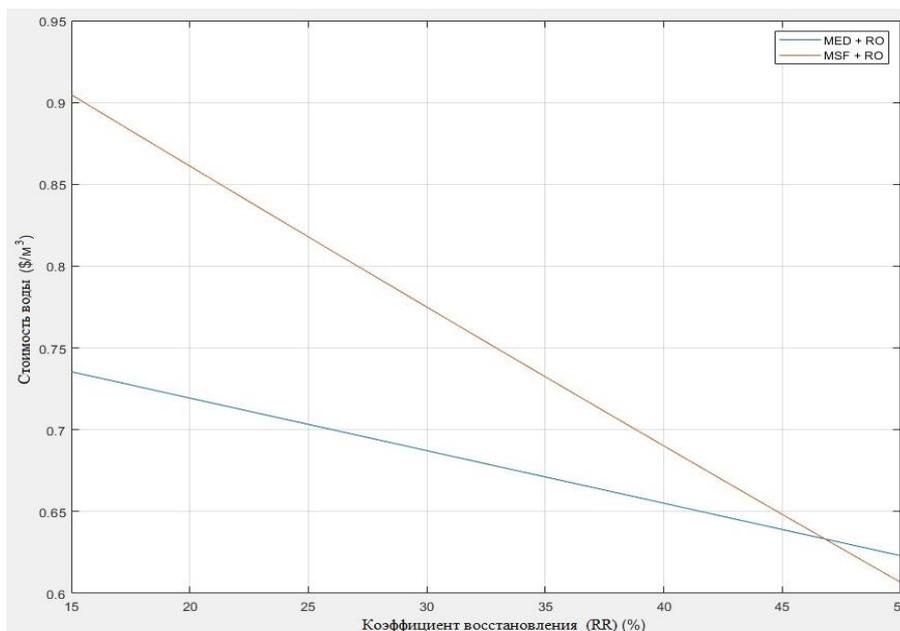


Рисунок 7. Зависимость стоимости производства 1 м³ пресной воды от коэффициента восстановления

Figure 7. The relationship between the recovery ratio and the cost of producing one cubic meter of fresh water

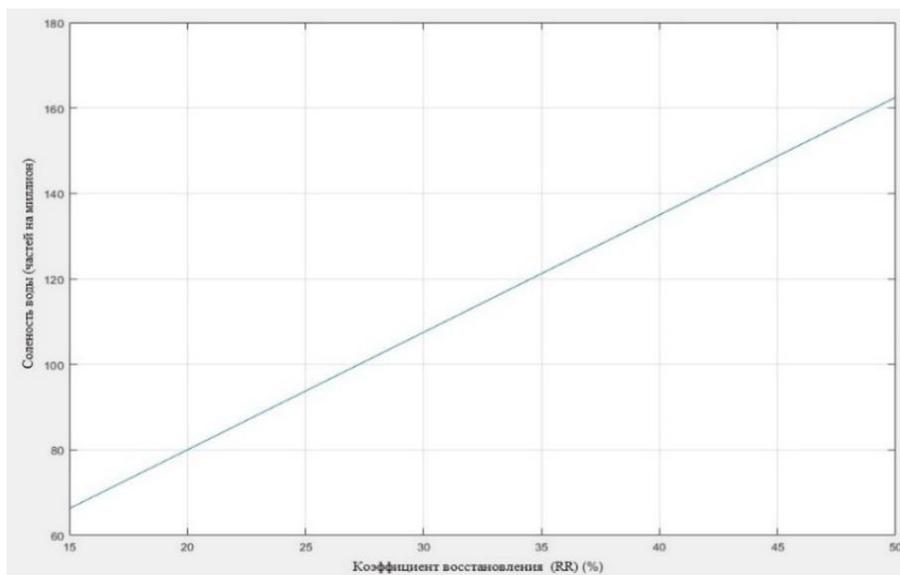


Рисунок 8. Зависимость солености воды от коэффициента восстановления

Figure 8. The relationship between recovery ratio and water salinity

Заключение

В данной статье представлен технико-экономический анализ сочетания солнечного и ядерного энергоисточника для нужд опреснения морской воды. В качестве примера было предложено разместить реактор малой мощности с солнечной электростанцией в городе Эль-Дабаа, Египет, с целью изучения экономической и технической целесообразности использования такого гибридного комплекса для опреснения морской воды.

Отдельным блоком были проведены расчеты различных опреснительных установок производительностью 100000 м³/сут для исследования степени влияния сочетания системы опреснения на итоговую стоимость воды. Были получены результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Стоимость производства 1 м³ опреснённой воды с использованием сочетания системы опреснения и без использования сочетания

Table 2. The cost of producing one cubic meter of desalinated water using hybrid desalination methods and the cost without using hybridization

Метод опреснения	Стоимость опреснения
MED	1,24 \$/м ³
MSF	1,22\$/м ³
RO	0,93 \$/м ³
RO+MED	0,74 \$/м ³
RO+MSF	0,91 \$/м ³

Стоимость производства одного кубометра пресной воды была рассчитана для двух вариантов: при использовании сочетания и без ее использования, при этом рассматривались разные значения коэффициентов восстановления, равные 15% и 50%. В результа-

те расчетов были получены стоимости, представленные в таблице 3.

Таблица 3. Стоимость производства 1 м³ опреснённой воды с использованием гибридных энергоисточников и без использования сочетания

Table 3. The cost of producing one cubic meter of desalinated water using hybrid energy sources and the cost without using hybridization

Коэффициент восстановления = 15%		
Метод опреснения	С сочетанием энергоисточников	без сочетания энергоисточников
RO + MED	0,74 \$/м ³	1,5 \$/м ³
RO + MSF	0,91 \$/м ³	1,53 \$/м ³
Коэффициент восстановления = 50%		
Метод опреснения	С сочетанием энергоисточников	без сочетания энергоисточников
RO + MED	0,62 \$/м ³	1,05 \$/м ³
RO + MSF	0,6 \$/м ³	1,51 \$/м ³

Следует отметить, что с увеличением коэффициента восстановления стоимость опреснения снижается, поскольку с увеличением коэффициента восстановления, увеличивается производство опресненной воды методом обратного осмоса, а производство опресненной воды с использованием технологии термического опреснения уменьшается, что приводит к снижению стоимости опреснения воды, поскольку метод обратного осмоса производит воду более низкого качества, но с более низкой стоимостью. была рассчитана соленость опресненной воды при изменении коэффициента восстановления в диапазоне от 15% до 50% и находилась в пределах 65-162 частей на миллион, а при использовании только метода обратного осмоса, соленость воды составляет около 300 частей на миллион, а при использовании только термических методов соленость воды менее 25 частей на миллион.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Naterer G.F., Dincer I., Zamfirescu C. Worldwide Nuclear Energy Research Programs. Hydrogen Production from Nuclear Energy. Springer-Verlag London Ltd, 2013. P. 65–97. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4938-5>
2. Lindroos T.J., Pursiheimo E., Sahlberg V., Tulkki V. A techno-economic assessment of NuScale and DHR-400 reactors in a district heating and cooling grid. *Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy*. 2019;14(1):13–24. <https://doi.org/10.1080/15567249.2019.1595223>
3. Vujić J., Bergmann R.M., Škoda R., Miletić M. Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper? *Energy*. 2012;45(1):288–295. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.078>

4. Devanand A., Kraft M., Karimi I.A. Optimal site selection for modular nuclear power plants. *Computers and Chemical Engineering*. 2019;125:339–350. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.03.024>
5. Nian V. The prospects of small modular reactors in Southeast Asia. *Progress in Nuclear Energy*. 2017;98:131–142. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.03.010>
6. Hossam-Eldin A., El-Nashar A., Ismaiel A. Investigation into Economical Desalination Using Optimized Hybrid Renewable Energy System. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2012;43(1):1393–1400. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.019>
7. Helal A., Al-Malek S., E. Al-Katheeri Economic feasibility of alternative designs of a PV-RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates. *Desalination*. 2008;221(1-3):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.064>
8. Ahmed A. Hossam-Eldin, Kamal A. Abed, Karim H. Youssef, Hossam Kotb. Techno-economic optimization and new modeling technique of PV-Wind-Reverse osmosis desalination plant at variable load conditions, *International Journal of Environmental Science and Development*. 2019;10(8):223–230. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2019.10.8.1177>
9. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Выбор электрооборудования автономной фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVsyst. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2020;20(2):77–88. <https://doi.org/10.14529/power200207>
10. Saleh M.M., Abdelrazek A.A., Mohammed A.F., Sokolova E.A. A Solution to the problem of fresh water shortage in Egypt using nuclear desalination. Proceedings of the 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering. REEPE 2024. <https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479700>
11. Steigerwald B., Weibezahn J., Slowik M., von Hirschhausen C. uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors. *Energy*. 2023;281:128204. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Салех М. – разработка программы исследований, анализ результатов расчетов, формулирование выводов;

Абдельразек А. – написание статьи, оформление материалов статьи;

Мохаммед А. – подбор литературных источников и обзор источников литературы по теме исследования;

Калютик А.А. – общее руководство работой, научное консультирование;

Соколова Е.А. – научное консультирование, редактирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Saleh M. – development of the research program, analysis of the results of calculations, formulating conclusions;

Abdelrazek A. – writing the paper, design of article materials;

Mohammed A. – selecting literary sources and preparing a review of literature sources on the research topic;

Kalyutik A.A. – general management of the work, scientific consulting;

Sokolova E.A. – scientific consulting, editing the text of the article.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Мостафа Салех, аспирант Высшей школы атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6888-1039>

e-mail: saleh.m@edu.spbstu.ru

Ахмед Абдельразек, аспирант Высшей школы атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5188-7798>

e-mail: abdelrazek.a@edu.spbstu.ru

Арафа Мохаммед, аспирант Высшей школы атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4531-3605>

e-mail: mohammed.a@edu.spbstu.ru

Александр Антонович Калютик, к.т.н., доцент, директор Высшей школы атомной и тепловой энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2965-357X>

e-mail: aa_kalyutik@spbstu.ru

Екатерина Андреевна Соколова, к.т.н., старший преподаватель Высшей школы атомной и тепловой энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-6258>

e-mail: sokolova_ea@spbstu.ru

Поступила в редакцию 06.04.2024

После доработки 07.06.2024

Принята к публикации 11.06.2024

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Mostafa Saleh, Postgraduate student, The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6888-1039>

e-mail: saleh.m@edu.spbstu.ru

Ahmed Abdelrazek, Postgraduate student, The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5188-7798>

e-mail: abdelrazek.a@edu.spbstu.ru

Arafa Mohammed, Postgraduate student, The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4531-3605>

e-mail: mohammed.a@edu.spbstu.ru

Alexander A. Kalyutik, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Director of The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2965-357X>

e-mail: aa_kalyutik@spbstu.ru

Ekaterina A. Sokolova, Cand. Sci. (Engin.), Senior Lecturer, The Higher School of Atomic and Thermal Power Engineering, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, St. Petersburg, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2018-6258>

e-mail: sokolova_ea@spbstu.ru

Received 06.04.2024

Revision 07.06.2024

Accepted 11.06.2024

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

УДК: 621.039.524.446

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

EDN GOPZCN

Оригинальная статья / Original paper



Нейтронное излучение источника движущегося в гравитационном поле

В.Я. Шпицер  , **В.В. Кривин** 

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

 shpitser@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена проблеме формирования нейтронного поля вблизи эллиптических орбит космических объектов, оснащённых ядерными энергетическими установками. На высокоэнергетическую часть спектра деления гравитационное поле не оказывает влияния. Радиационная безопасность обеспечивается справедливой для точечного источника триадой: активность – расстояние – время. Для тепловой (околотепловой) части спектра возникает связь между параметрами орбиты космического объекта и плотностью потока нейтронов. Рассмотрена гипотеза образования устойчивого нейтронного следа в объёме «тора» вокруг орбиты космического объекта. В работе представлены теоретические и численные свидетельства справедливости выдвинутой гипотезы. Во введении рассматривается сепарационный эффект принципа относительности Галилея при прямолинейном равномерном движении точечного изотропного источника нейтронов на плоскости. Иллюстрируется возникновение угловой асимметрии распределения нейтронов в неподвижной системе координат, когда их относительная скорость близка к переносной скорости источника. В этих условиях также фиксируется значительная дисперсия скоростей первоначально монохроматических нейтронов. Этот ожидаемый фундаментальный кинематический эффект обуславливает характерное распределение нейтронов в гравитационном поле при движении источника по кеплеровой орбите. Решение задачи проведено в пространстве скоростей. Утверждается, что если распределение нейтронов в пространстве скоростей таково, что их скорости коллинеарны орбитальной скорости источника, то это свидетельствует о существовании потока нейтронов вблизи орбиты. Проблема анализируется на примере одного витка гипотетической космической станции методом имитационного моделирования. С этой целью в восьми точках эллиптической орбиты генерировались пакеты тепловых нейтронов с изотропным угловым распределением. В системе координат, связанной с землёй, сравнивались потоки скоростей нейтронов и источника в выбранных точках орбиты. Полученные данные позволили рассчитать плотности потоков скоростей нейтронов в переднюю и заднюю полусферы относительно движения источника по орбите как функции полярного угла, при этом фиксировалось значение определителя корреляционной матрицы – индикатора коллинеарности векторов скоростей нейтронов в потоке. Результаты исследований подтверждают выдвинутую гипотезу о возможности образования «следа» на орбите источника тепловых нейтронов, что определяет необходимость учитывать его как значимый компонент радиационного риска.

Ключевые слова: изотропный источник нейтронов, анизотропия поля, кеплеровская орбита, нейтронный след, кинематический эффект.

Для цитирования: Шпицер В.Я., Кривин В.В. Нейтронное излучение источника движущегося в гравитационном поле. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):31–39. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-03>

For Citation: Shpitser V.Ya., Krivin V.V. Neutron emission from a source moving in a gravitational field. *Global Nuclear Safety*. 2024;14(2):31–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-03>

Neutron emission from a source moving in a gravitational field**Vladimir Y. Spitzer**  , **Valery V. Krivin** *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
 shpitser@mail.ru*

Abstract. This work is devoted to the problem of neutron field formation near elliptical orbits of space objects equipped with nuclear power plants. The high-energy part of the fission spectrum is not affected by the gravitational field. Radiation safety is ensured by the triad fair for a point source: activity-distance-time. The connection between space object orbit parameters and neutron flux density occurs for the thermal (near-thermal) part of the spectrum. The possibility of formation of a stable neutron trace in the volume of a «torus» around the orbit of a space object is considered. The paper presents theoretical and numerical evidence of the validity of the hypothesis put forward. The introduction considers the separation effect of Galileo's relativity principle in the case of rectilinear uniform motion of a point isotropic neutron source on a plane. The occurrence of angular asymmetry of the neutron distribution in a stationary coordinate system when their relative velocity is close to the transport velocity of the source is illustrated. Under these conditions, a significant velocity dispersion of initially monochromatic neutrons is also recorded. This expected fundamental kinematic effect determines the characteristic distribution of neutrons in the gravitational field when the source moves along the Kepler orbit. The solution of the problem is carried out in the velocity space. It is argued that if the distribution of neutrons in the velocity space is such that their velocities are collinear to the orbital velocity of the source, this indicates the existence of a neutron flux near the orbit. The problem is analysed on the example of one revolution of a hypothetical space station by simulation modelling. For this purpose, thermal neutron packets with isotropic angular distribution were generated at eight points of an elliptical orbit. The neutron and source velocity fluxes at the selected points of the orbit were compared in a coordinate system related to the earth. The obtained data made it possible to calculate the densities of neutron velocity fluxes to the front and rear hemispheres relative to the source orbital motion as a function of the polar angle, while the value of the determinant of the correlation matrix – an indicator of collinearity of neutron velocity vectors in the flux – was fixed. The results of the studies confirm the hypothesis put forward about the possibility of formation of a «trace» in the orbit of a thermal neutron source, which determines the need to take it into account as a significant component of radiation risk.

Keywords: isotropic neutron source, field anisotropy, Keplerian orbit, neutron trace, kinematic effect.

Введение

Для инерционных систем отсчёта (согласно принципу относительности Галилея) справедлив закон сложения скоростей: абсолютная скорость нейтрона v в покоящейся системе отсчёта (x, y, z) равна сумме переносной скорости V движущейся системы (x', y', z') , связанной с источником и относительной скорости v' нейтрона, испущенного источником.¹ Сферически симметричное поле изотропного источника увлекается им вдоль траектории движения. Кинематиче-

ский эффект обуславливает возникновение анизотропии поля в лабораторной (неподвижной) системе координат, выраженной в виде следа роя частиц.

Источники нейтронов, которыми являются все ядерные энергетические установки, являются изотропными со сплошным энергетическим спектром, перекрывающим интервал значимых скоростей на траекториях летательных аппаратов (ЛА) [1]. Можно ожидать, что в течение, по крайней мере, равной периоду полураспада нейтрона (~ 613.9 с) ЛА будет сопровождать «рой» из $10^8 \div 10^{12}$ частиц.

На рисунке 1 представлены среднеквадратическое отклонение скорости нейтронов и его отношение к среднему значению (коэффициент вариации) для изотропного источника, движущегося прямолинейно и равно-

¹ Айзерман М.А. Классическая механика : учебное пособие. – Москва: Наука, 1980. – 368 с. – Режим доступа: <https://djvu.online/file/ueRjMhRf7oODt?ysclid=lxed4onu1h956444378> (дата обращения: 02.04. 2024).

мерно в лабораторной системе координат со скоростью 1 км/с в функции отношения скоростей нейтрон/источник.

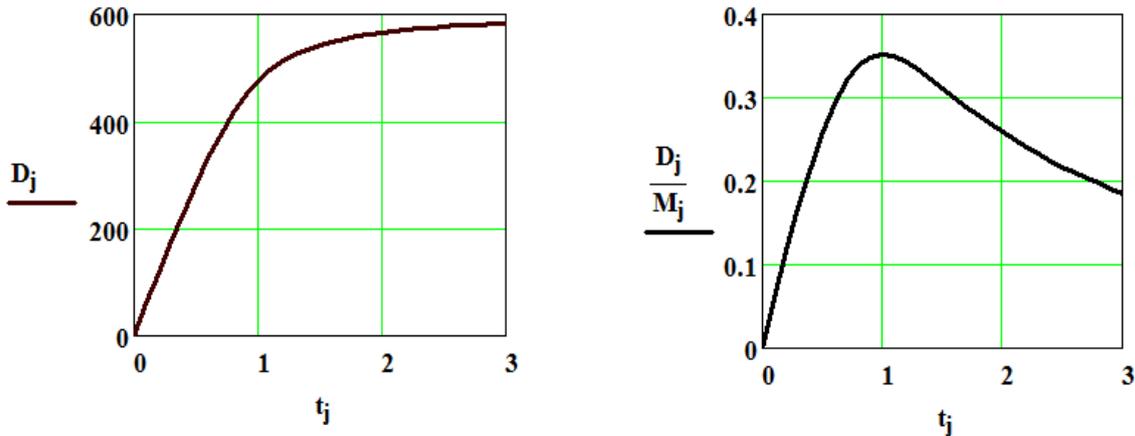


Рисунок 1. Среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации скорости нейтронов t_j – отношение скоростей нейтрон/источник [составлено авторами]
Figure 1. Standard deviation and coefficient of variation of neutron velocity t_j – neutron/source velocity ratio [compiled by the authors]

Эти графики являются демонстрацией классического принципа Галилея для изотропного источника, равномерно перемещающегося на плоскости при различных значениях отношений (скорость нейтрона/скорость источника) (км/с). Из рисунка 1 можно сделать вывод, что разброс значений скорости нейтронов наибольший при совпадении их со скоростью источника. Результаты получены прямой имитацией движения нейтронов методом Монте-Карло.

Следующий график продолжает иллюстрацию, визуализируя коридор скоростей вблизи среднего значения, шириной равной удвоенному среднеквадратическому значению. На рисунке 2 представлен коридор $(M_j \pm D_j)$ среднего значения скорости нейтронов в лабораторной системе координат для изотропного источника, движущегося прямолинейно и равномерно со скоростью 1 км/с в функции отношения скоростей нейтрон/источник.

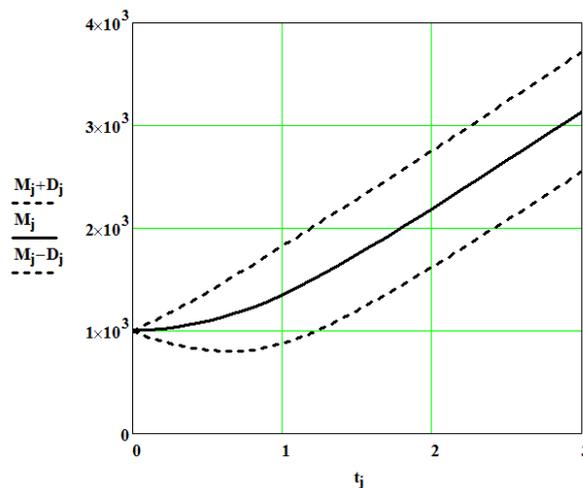


Рисунок 2. Коридор $(M_j \pm D_j)$ среднего значения скорости нейтронов в лабораторной системе координат для изотропного источника, движущегося прямолинейно и равномерно со скоростью 1 км/с в функции отношения скоростей нейтрон/источник [составлено авторами]
Figure 2. Corridor $(M_j \pm D_j)$ of the mean value of neutron velocity in the laboratory coordinate system for an isotropic source moving straight and uniformly at 1 km/s as a function of the neutron/source velocity ratio [compiled by the authors]

На рисунке 3 представлено сечение (X, Z) роя из 100 нейтронов через 613.9 с, после их излучения источником в начале координат (0,0), что характеризует возникновение зна-

чительной асимметрии в первоначально изотропном угловом распределении нейтронов при их скоростях совпадающих со скоростью источника.

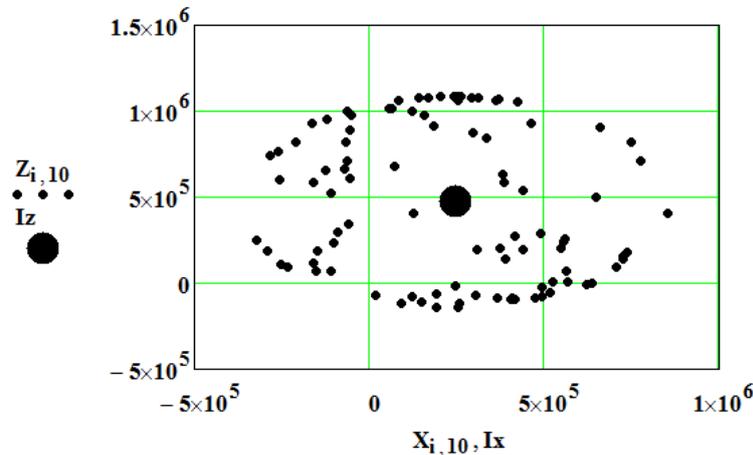


Рисунок 3. Сечение роя из 100 нейтронов через 613.9 с, после их излучения в начале координат (0,0).
Здесь (Ix, Iz) – положение источника в конце движения [составлено авторами]

Figure 3. Cross section of a swarm of 100 neutrons after 613.9 s, after their emission at the origin (0,0).
Here (Ix, Iz) is the position of the source at the end of the motion [compiled by the authors]

Представленный графический образ эволюции «облака» нейтронов демонстрирует сепарационный эффект классического принципа Галилея при прямолинейном равномерном движении точечного изотропного источника нейтронов на плоскости. Это позволяет сделать вывод об определяющей роли кинематического фактора (отношение скоростей нейтрон/источник) в формировании нейтронного поля. Данный результат, быть может, и является тривиальным, однако до сих пор не обсуждался специалистами [2].

Излучение источника, движущегося в центральном гравитационном поле

Гравитационные поля обладают основным свойством: все тела вне зависимости от их массы движутся в них (при заданных начальных условиях) одинаковым образом. В центральном гравитационном поле источник движется по кеплеровской орбите. Будем считать выделенной (по критерию радиационной опасности) область вблизи траектории источника. Индикатором опасности примем поток скорости нейтронов в этой области. Исходя из кинематического эффекта, увеличение значений этого индикатора, за счёт сепарации орбит, возможно для спек-

тров, в которых средняя скорость нейтронов близка скорости источника. Прототипом этой задачи отчасти служит направление в астрофизике, изучающее образование пылевых облаков при выбросе вещества с поверхности космических тел [3,4]. Несмотря на разную физику процессов, исследование облаков частиц в гравитационном поле, требует привлечение однотипных уравнений.

Пусть по эллиптической орбите вокруг земли движется спутник массой m_c – носитель изотропного источника нейтронов. В момент t_0 излучается импульс Q . Этот эпизод рассмотрим в неподвижной декартовой системе координат, связанной с землёй, рисунок 4. Ось x направим в точку нахождения спутника в момент излучения. Ось y направим ортогонально x в плоскости орбиты в сторону движения. Ось z направим по вектору площади орбиты спутника.

Скорость спутника в момент импульса равна (1):

$$v_0 = w \cdot (\sin f, \cos f, 0). \quad (1)$$

Здесь вектор скорости представлен в координатной форме. Модуль вектора скорости выражается через параметры орбиты

спутника (фокальный параметр и эксцентриситет) по формуле (2):

$$w = \frac{\kappa}{\sqrt{\rho_0}} K. \quad (2)$$

Здесь

$$K = \sqrt{1 + 2e_0 \cos \varphi_0 + e_0^2}; \quad 1 - e_0 \leq K \leq 1 + e_0,$$

где κ^2 – произведение постоянной тяготения

$$G = 6.6726 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{с}^{-2} / \text{кг} \text{ на массу земли}$$

$$M_3 = 5.977 \cdot 10^{24} \text{ кг};$$

φ – полярный угол (истинная аномалия)

отсчитывается от полярной оси против часовой стрелки. При $\varphi=0$ – перигей орбиты (П). В перигее вектор скорости перпендикулярен большой оси эллипса, радиальная составляющая скорости равна нулю, а модуль скорости имеет максимальное значение;

f – угол, на который надо повернуть вектор скорости v_0 до совмещения с лучом Oy' , параллельным лучу Oy .

По формулам кеплеровского движения выражаем связь между действующими углами φ_0 и f (3)² [4]:

$$\cos f = \frac{1 + e_0 \cos \varphi_0}{K}, \quad \sin f = \frac{e_0 \sin \varphi_0}{K}. \quad (3)$$

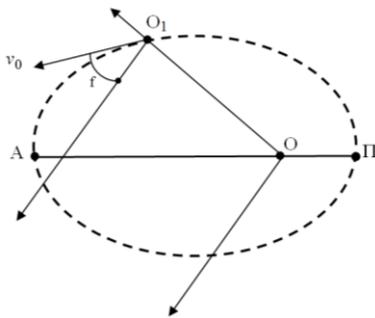


Рисунок 4. Модель излучения импульса на орбите изотропного источника нейтронов [составлено авторами]

Figure 4. Model of pulse radiation in the orbit of an isotropic neutron source [compiled by the authors]

² Холшевников К.В., Титов В.Б. Задача двух тел: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2007. – 180 с. – Режим доступа: <https://vdocuments.mx/-57ade25e1a28abbe3a977d29.html> (дата обращения: 02.04.2024).

Все параметры орбиты спутника (p , e , a – большая полуось, b – малая полуось, T – период обращения) выражаются через расстояние r_{Π} = ОП и скорость v_{Π} в перигее.

Если изотропию излучения нейтронного источника описывать углами θ и λ на единичной сфере, $w_n(\theta, \lambda)$ – скорость нейтрона при вылете, то в неподвижной системе координат мгновенный вектор скорости нейтрона равен (4) [3]:

$$v_n = w \cdot (\sin f + c \sin \theta \cos \lambda, \cos f + c \sin \theta \sin \lambda, c \cos \theta) \quad (4)$$

Модуль скорости нейтрона (5):

$$|v_n| = wL, \quad L = \sqrt{1 + 2c \sin \theta \sin(f + \lambda) + c^2},$$

$$1 - c \leq L \leq 1 + c, \quad (5)$$

где $c(\theta, \lambda) = w_n(\theta, \lambda)/w$ – безразмерная скорость (параметр выброса).

Поток векторного поля v_n через площадку, нормаль n которой совпадает с направлением скорости спутника v_0 в некоторой точке траектории задаётся скалярным произведением этих векторов (6):

$$P = nv_n = w \cdot [\sin f \cdot (\sin f + c \sin \theta \cos \lambda) + \cos f \cdot (\cos f + c \sin \theta \sin \lambda) + \alpha \cdot c \cos \theta], \quad (6)$$

где α – корректирующий коэффициент (~ 0) для учета реального объёма источника нейтронов.^{3,4}

Исследуем изменение значений потока векторного поля скорости нейтронов в различных точках орбиты спутника $P(\varphi_0)$. Для этого воспользуемся имитационной моделью

³ Веретенников В.Г., Сеницын В. А. Теоретическая механика (дополнение к общим разделам) : учебное пособие. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 416 с. – Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/47551?category_pk=930&publisher_fk=0 (дата обращения: 02.04.2024).

⁴ Безменов В.М., Прокофьев Л.Н. Векторная алгебра : учебное пособие. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, 2001. – 60 с. – Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000733580/?ysclid=lxee7hod8a492636066 (дата обращения: 02.04.2024).

движения гипотетической орбитальной станции.⁵

Параметры движения гипотетической орбитальной станции с $r_{\Pi} = 7.0 \times 10^3$ км; $v_{\Pi} = 9.0 \times 10^3$ м/с приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры орбиты гипотетической околоземной станции [составлено авторами]

Table 1. Orbit parameters of a hypothetical near-Earth station [compiled by the authors]

Параметр	Идентифицирующее уравнение	Числовое значение
p – фокальный параметр	$\rho = \frac{v_{\Pi}^2 r_{\Pi}^2}{GM_3}$	$9,95210^3$, км
e – эксцентриситет	$e = \frac{p}{r_{\Pi}} - 1$	0,422
a – большая полуось	$\alpha = \frac{p}{1 - e^2}$	$1,2110^4$, км
b – малая полуось	$b = \sqrt{\alpha p}$	$1,09810^4$, км
T – период обращения	$T = 2\pi\alpha b / (60v_{\Pi})$	220,823 мин

Источник нейтронов, находящийся на станции, непрерывно излучает, так что в некоторой области создаётся динамическое равновесие плотности нейтронов. Ожидаем, что гравитационное поле распределяет часть нейтронов по орбитам и удерживает их в потоке, поперечное сечение которого, перпендикулярно траектории станции.

Интервал скоростей, характерный для эллиптических орбит эквивалентен энергии нейтронов в абсолютной системе координат:

$E_n \approx (0.327 \div 0.657)$ эВ, следовательно, $v_{отн}$ предполагает группы,

$E_n \approx (0.005 \div 0.330)$ эВ, излучаемые в переднюю полусферу (по направлению движения) и $E_n \approx (0.005 \div 1.314)$ эВ в заднюю, относительно источника. По принятой классификации это соответствует энергии тепловых и надтепловых нейтронов. Доля таких нейтронов в спектре источника, может быть невелика. Она максимальна для ядерных ре-

акторов на тепловых нейтронах со спектром Максвелла.

Будем считать, что эффект накопления нейтронов следует ожидать для орбитальных станций, рассеивающих в окружающее пространство нейтроны со спектром значений энергии в интервале $E=(0.0 - 2.0)$ эВ [5]. Среднее время жизни нейтрона в свободном состоянии $\tau=885.7$ секунды, т.е. «пучок орбит» нейтронов может поддерживаться в некотором «торе» окружающем орбиту источника за счёт статистического равновесия процессов рождение – распад (7):

$$N(t) = N_0(t)e^{-t/\tau}. \quad (7)$$

Воспользуемся максвелловским распределением вида (8):

$$N(E) = \left(2/\sqrt{\pi\sigma^3}\right)\sqrt{E} \exp\left(-\frac{E}{\sigma}\right). \quad (8)$$

На интервале $E=(0.0 - 1.5)$ эВ. Максимум распределения достигается при $E_{\max} = \frac{\sigma}{2}$ эВ. Здесь σ – варьируемый параметр, управляемый средней энергией спектра $\bar{E} = \frac{3}{2}\sigma$. Для $\bar{E}=0.45$ эВ. $\sigma=0.3$ эВ.

На рисунке 5 представлена форма кривой с данным параметром. Выборка из спектра строится на базе алгоритма Неймана [6]. Для каждого разыгранного значения энергии скорость частицы вычисляется по формуле:

$$v_n = \sqrt{\frac{2E}{m_n}} = 1.383210^4 \sqrt{E} \text{ м/с}. \quad (9)$$

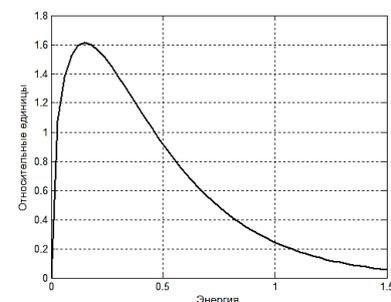


Рисунок 5. Спектр нейтронов на интервале (0–1.5) эВ, $\sigma=0.3$ [составлено авторами]
Figure 5. Neutron spectrum at the interval (0–1.5) eV, $\sigma=0.3$ [compiled by the authors]

⁵ Мирер С.А. Механика космического полёта. Орбитальное движение : учебно-методическое пособие. – Москва: Изд-во МФТИ, 2013. – Режим доступа: <https://keldysh.ru/kurmove.pdf> (дата обращения: 02.04.2024).

Разделим орбиту станции точками так, что две из них совпадают с перигеем и апогеем, а остальные равномерно распределены по орбите. В каждой точке источник излучает пакет из 1000 нейтронов. Такая модель даёт возможность поддерживать статистику на уровне имеющихся вычислительных ресурсов. Увеличение числа точек деления орбиты приближает модель к представлению непрерывного излучения.

Моделирование «нейтронного следа» источника заданного спектра в гравитационном поле включает: равномерное изотропное угловое распределение нейтронов в трёхмерном пространстве относительных скоростей; реализацию алгоритма Неймана; формирование матрицы плотности потока скорости в каждой точке деления траектории с учётом вклада излучения от предыдущей. Результаты исследования получим в виде матрицы $P=(P_{ij})$. Здесь индекс j – номер столбца соответствует номеру точки деления орбиты спутника, начиная с перигея, индекс i – номер строки соответствует номеру нейтрона в пакете. Матрицу P представим в виде двух матриц: $M^+ > 0$ – плотность потока скорости нейтронов в переднюю полусферу по направлению движения; $M^- < 0$ – плотность потока скорости нейтронов в заднюю полусферу по направлению движения. Объединение обеих матриц по вертикали даёт исходную матрицу P без нулевых строк. На каждой из этих матриц определим математическое ожидание в столбцах –

средняя плотность потока скоростей нейтронов в точке деления орбиты спутника (D, R) и значение определителя корреляционной матрицы $|Matrix_{9 \times 9}[corr(\cdot)]|$ – индикатор коллинеарности векторов скоростей нейтронов в потоке.

На рисунке 6 представлены плотности потоков скоростей нейтронов в переднюю D и заднюю R полусферы относительно движения источника по орбите как функция полярного угла $\varphi_0 = (0 \div 2\pi)$ (истинная аномалия – отсчитывается от полярной оси против часовой стрелки). При $\varphi_0 = 0$ – перигей орбиты (Π).

Вектора скоростей коллинеарны (9):

$$|Matrix_{9 \times 9}[corr(M^+)]| = |Matrix_{9 \times 9}[corr(M^-)]| = 0 \quad (10)$$

т.е. поток тепловых нейтронов образует устойчивый след при движении источника в гравитационном поле.

Имитационным расчётным путем показано, что вектора скоростей источника и нейтронов вблизи орбиты коллинеарны, то есть (также как при ламинарном движении), поток тепловых нейтронов образует устойчивый след при движении источника в гравитационном поле. Рисунок 6 демонстрирует гармоническую осцилляцию величины плотности потока скоростей, что соответствует движению источника по замкнутой орбите.

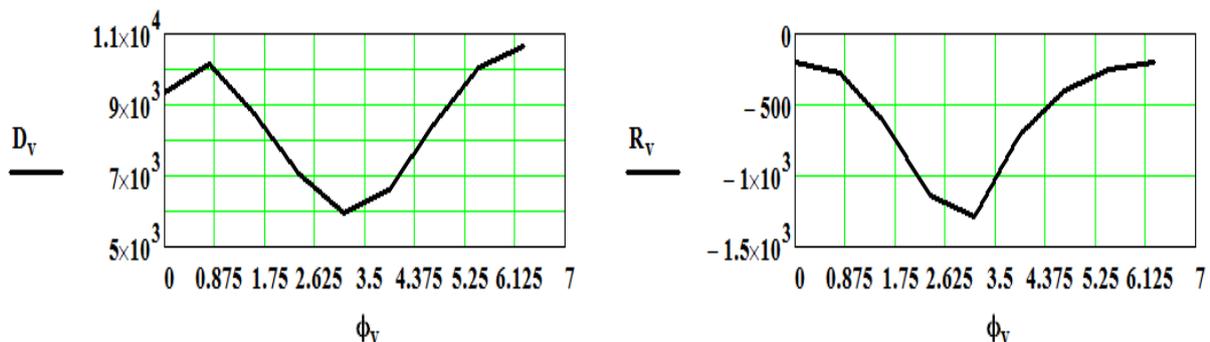


Рисунок 6. Плотности потоков скоростей нейтронов в переднюю D и заднюю R полусферы относительно движения источника по орбите как функция полярного угла $\varphi_0 = (0 \div 2\pi)$
 [составлено авторами]

Figure 6. Neutron velocity flux densities to the front D and rear R hemispheres relative to the source orbital motion as a function of the polar angle $\varphi_0 = (0 \div 2\pi)$ [compiled by the authors]

Тренд увеличения абсолютных значений за период обращения свидетельствует о накоплении нейтронов в облаке.

Выводы

Рассмотрена гипотеза о возможности образования устойчивого нейтронного следа вокруг орбиты космического объекта, имеющего на борту ядерную энергетическую установку на тепловых нейтронах.

Гипотеза подтверждена на частном демонстрационном примере методом имитационного моделирования.

Результаты получены на основе фундаментальных соотношений современной астрофизики, являются совершенно уникальными. Обоснованность используемых моделей подтверждена опытом специалистов многих стран.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что впервые обращается внимание на существование особой компоненты радиационного риска, связанной с использованием РУ на тепловых нейтронах в качестве энергоисточников на космических аппаратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Зродников А.В., Ионкин В.И. А.И. Лепунский и ядерные энергетические установки для космических исследований. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2003;4:19–27. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2003/04.pdf> (дата обращения: 07.05.2024).

Zrodnikov A.V., Ionkin V.I. A.I. Lepunsky and Nuclear Power Plants for Space Research. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2003;4:19–27. Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2003/04.pdf> (accessed: 07.05.2024).

2. Гинзбург В.Л. Излучение равномерно движущихся источников (эффект Вавилова – Черенкова, переходное излучение и некоторые другие явления). *Акустический журнал*. 2005;51(1):24–36. Режим доступа: http://www.akzh.ru/pdf/2005_1_24-36.pdf (дата обращения: 07.05.2024).

Ginzburg V.L. Radiation of uniformly moving sources (Vavilov-Cherenkov effect, transient radiation and some other phenomena). *Acoustical Journal*. 2005;51(1):24–36. Available at: http://www.akzh.ru/pdf/2005_1_24-36.pdf (accessed: 07.05.2024).

3. Орлов С.А., Холшевников К.В. Орбитальный пылевой тор как огибающая поверхность семейства траекторий изотропно выброшенных частиц. *Астрономический вестник*. 2008;42(2):99–118. Режим доступа: <https://naukarus.com/orbitalnyy-pylevoy-tor-kak-ogibayuschaya-poverhnost-semeystva-traektoriy-izotropno-vybrosennyh-chastiits> (дата обращения: 07.05.2024).

Orlov S.A., Kholshchevnikov K. V. An orbital dust torus as an envelope surface of a family of trajectories of isotropically ejected particles. *Astronomical Bulletin*. 2008;42(2):99–118. Available at: <https://naukarus.com/orbitalnyy-pylevoy-tor-kak-ogibayuschaya-poverhnost-semeystva-traektoriy-izotropno-vybrosennyh-chastiits> (accessed: 07.05.2024).

4. Холшевников К.В., Орлов С.А. О форме облака частиц, выброшенных с поверхности небесного тела. Материалы 46-й Международной студенческой научной конференции: Физика Космоса. Екатеринбург, 30 января – 3 февраля 2017 г. С. 148–168. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29103288> (дата обращения: 07.05.2024).

Kholshchevnikov K.V., Orlov S.A. On the shape of a cloud of particles ejected from the surface of a celestial body. Proceedings of the 46th International Student Scientific Conference: Space Physics. Yekaterinburg, January 30 – February 3, 2017. P. 148–168. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29103288> (accessed: 07.05.2024).

5. Кошелев А.С., Севастьянов В.Д. Аналитическое представление спектра нейтронов деления ^{235}U и ^{252}Cf . *Атомная энергия*. 2000;88(4):299–303. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t88-4_2000/p299/

Koshelev A.S., Sevastyanov V.D. Analytical representation of the fission neutron spectrum of ^{235}U and ^{252}Cf . *Atomic Energy*. 2000;88(4):299–303. Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t88-4_2000/p299/ (accessed: 07.05.2024).

6. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Т.2. Получисленные алгоритмы. Перевод с английского. Москва: Издательский дом Вильямс, 2001. 832 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/AK1GKM4qtVd6r?ysclid=lxeeffmw6wx154860458> (дата обращения: 07.05.2024).

Knuth D.E. The art of programming. Vol.2. Semi-numerical algorithms. English translation. Moscow: Williams Publishing House, 2001. 832 p. Available at: <https://djvu.online/file/AK1GKM4qtVd6r?ysclid=lxefmw6wx154860458> (accessed: 07.05.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Шпицер В.Я. – подтверждение методом имитационного моделирования гипотезы о возможности образования устойчивого нейтронного следа вокруг орбиты космического объекта, имеющего на борту ядерную энергетическую установку на тепловых нейтронах. Написание текста статьи, подготовка и опубликованию результатов исследования.

Кривин В.В. – выполнение измерений, анализ экспериментальных данных, подбор литературных источников, редактирование текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования. Инициативное исследование.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шпицер Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5051-5091>

e-mail: shpitser@mail.ru

Кривин Валерий Вольфович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0903-0786>

e-mail: VVKrivin@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Shpitser V.Y. – confirmation by simulation modeling of the hypothesis about the possibility of formation of a stable neutron trace around the orbit of a space object with a thermal neutron nuclear power plant on board. Writing the text of the article, preparation and publication of the research results.

Krivin V.V. – performance of measurements, analysis of experimental data, selection of literature sources, editing of the text of the article.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding. Initiative research.

CONFLICT OF INTEREST:

There is no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir Y. Shpitser, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Nuclear Power Engineering, Volgondsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgondsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5051-5091>

e-mail: shpitser@mail.ru

Valery V. Krivin, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Information and Control Systems, Volgondsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgondsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0903-0786>

e-mail: VVKrivin@mephi.ru

Поступила в редакцию 18.02.2024

После доработки 27.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

Received 18.02.2024

Received 27.05.2024

Accepted 04.06.2024

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

УДК 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-2-04>

EDN HSFGRF

Оригинальная статья / Original paper



Расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности уплотнений
элементов локализирующих систем безопасности энергоблоков с ВВЭР

С.Б. Кравец¹ , С.А. Кузин^{2,3}  , В.М. Сапельников³ 
С.Е. Синельщикова³ , А.А. Поволоцкая³ , В.Г. Бекетов³ 

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

² АО «Атоммашэкспорт», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

³ Волгодонский инженерно-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация
 KuzinSergey55@mail.ru

Аннотация. Актуальность данной работы определена необходимостью прогнозировать работу узлов уплотнений для элементов локализирующих систем безопасности (ЛСБ) энергоблоков с ВВЭР, к которым относятся (проходки, люки, шлюзы, двери и другие элементы герметичного ограждения (ГО) в эксплуатационных режимах. Под эксплуатационными режимами понимаются режимы нормальной эксплуатации, режимы нарушения нормальной эксплуатации, а также аварийные ситуации. При изготовлении и эксплуатации элементов ЛСБ возникает проблема неравномерного выступления двухрядного резинового уплотнения из пазов в полотне элемента ЛСБ, что приводит к необходимости уточнения интегрального усилия обжатия уплотнения в целом для этого элемента. Проблема вызвана несовершенством технологии изготовления полотен больших размеров для элементов ЛСБ (двери, люки, шлюзы: периметр уплотнений может достигать 10-20 м, диаметр полотна 2-6 м) и необходимостью при этом выдерживать жесткие технологические требования по плоскостности, параллельности и предельным отклонениям по линейным и угловым размерам. Изготовление габаритных конструкций усложняется наличием сварных соединений, термообработки, сложности металлообработки. Усилие обжатия резиновой прокладки ПНАЭ-7-002-86 не регламентируется, поэтому для надежного конструирования механизмов обжатия прокладки была определена величина этого усилия. На основе полученных результатов испытаний резиновых уплотнений на герметичность и циклические нагрузки выполнена оценка герметичности применяемых резиновых уплотнений, выполнены расчеты деформаций резиновых уплотнений по программному комплексу МКЭ. Разработаны рекомендации по увеличению надежности работы узлов уплотнений для элементов локализирующих систем безопасности (ЛСБ) энергоблоков с ВВЭР в эксплуатационных режимах и выбору величины обжатия для определения необходимого усилия, обеспечивающего герметичность в начале эксплуатации и через 5000 циклов открытия-закрытия.

Ключевые слова: проходки, шлюз, резиновые уплотнения, элементы локализирующих систем безопасности, эксплуатационные режимы, ВВЭР

Для цитирования: Кравец С.Б., Кузин С.А., Сапельников В.М., Синельщикова С.Е., Поволоцкая А.А., Бекетов В.Г. Расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности уплотнений элементов локализирующих систем безопасности энергоблоков с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):40–51. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-04>

For citation: Kravets S.B., Kuzin S.A., Sapelnikov V.M., Sinelshchikova S.E., Povolotskaya A.A., Beketov V.G. Computational and experimental substantiation of the operability of seals of localizing safety system elements of power units with VVER. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):40–51 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-04>

Computational and experimental substantiation of the operability of seals of localizing safety system elements of power units with VVER

Sergey B. Kravets¹ , Sergey A. Kuzin^{2,3}  , Vyacheslav M. Sapelnikov³ , Sofya E. Sinelshchikova³, Anastasia A. Povolotska³, Vladimir G. Beketov³ 

¹Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Moscow, Russian Federation

²JSC «Atommashexport», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation

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

³Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 KuzinSergey55@mail.ru

Abstract. The relevance of this work is determined by the need to predict the operation of sealing assemblies for elements of localizing safety systems (LSSs) of power units with VVER, which include (penetrations, hatches, locks, doors and other elements of hermetic fencing (GF) in operational modes. Operational modes are understood as modes of normal operation, modes of violation of normal operation, as well as emergency situations. During the manufacture and operation of LSS elements, the problem arises of uneven protrusion of a double-row rubber seal from the grooves in the web of the LSS element, which leads to the need to clarify the integral compression force of the seal as a whole for this element. The problem is caused by the imperfection of the manufacturing technology of large canvases for LSS elements (doors, hatches, locks: the perimeter of the seals can reach 10-20 m, the diameter of the canvas 2-6 m) and the need to withstand stringent technological requirements for flatness, parallelism and marginal deviations in linear and angular dimensions. The manufacture of overall structures is complicated by the presence of welded joints, heat treatment, and the complexity of metalworking. Compression force of the PNAE rubber gasket-7-002-86 it is not regulated, therefore, for the reliable design of gasket compression mechanisms, the magnitude of this force was determined. Based on the obtained results of tests of rubber seals for tightness and cyclic loading [7], an assessment of the tightness of the applied rubber seals is performed, calculations of deformations of rubber seals are performed using the FEM software package. Recommendations have been developed to increase the reliability of seal assemblies for elements of localizing safety systems (LSSs) of VVER power units in operational modes and to select the compression value to determine the necessary force to ensure tightness at the beginning of operation and after 5000 opening-closing cycles.

Keywords: penetrations, sluice, rubber seals, elements of localizing safety systems, operating modes, VVER.

Основной функцией локализирующих систем безопасности (далее – ЛСБ) атомных электрических станций, согласно Общим положениям обеспечения безопасности атомных станций¹, является ограничения распространения радиоактивных веществ за границы локализации аварии. Эта функция

должна выполняться в режимах нормальной эксплуатации, режимах нарушения нормальной эксплуатации и при протекании проектных аварий. В связи с этим обеспечение работоспособности уплотнений элементов ЛСБ является важной задачей обеспечения радиационной безопасности². Уплотне-

¹ Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Основные положения. НП-001-15. – Режим доступа: https://docs.secncs.ru/documents/nps/НП-001-15/НП-001-15_conv.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

² Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций. НП-010-16. – Режим доступа: https://docs.secncs.ru/documents/nps/НП-010-16/НП-010-16_conv.pdf (дата обращения: 15.03.2024).

ния элементов ЛСБ образуют границу зоны локализации аварии и должны обеспечивать требуемую в соответствии с проектом АЭС герметичность как при нормальной эксплуатации АЭС, так и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии.

К уплотнениям элементов ЛСБ (шлюзы, герметичные двери) предъявляются специальные требования: радиационная стойкость, большой температурный диапазон работы (минус 50 °С до плюс 200 °С); малое усилие обжатия; большой «рабочий ход», обеспечивающий герметичность соединения. Поэтому с целью обеспечения радиационной стойкости и повышенного температурного диапазона рабочих температур уплотнения элементов ЛСБ изготавливаются из специальной резины по ТУ 38 1051325-2008 «Изделия резинотехнические для атомной техники»³.

При работе транспортного шлюза проводится постоянный контроль герметичности с использованием специальной системы, обеспечивающий постоянный мониторинг протечек воздуха. Предельные величины протечек воздуха определяются и обосновываются в проектной документации на шлюз, а затем приводятся в технологическом регламенте безопасной эксплуатации энергоблока АЭС.

Для снижения усилия обжатия уплотнения и обеспечения увеличенного по сравнению с применявшимися ранее уплотнениями «рабочего хода», обеспечивающего герметичность соединения, в 2012 г. ОАО «ВНИИАМ» была предложена новая конструкция уплотнения, которая нашла применение на всех современных энергоблоках АЭС с ВВЭР для уплотнения разъемных соединений шлюзов. Примерная конструкция уплотнения шлюза показана на рисунке 1, а установка уплотнений показана на рисунке 2. Необходимость установки двухрядного резинового уплотнения обусловлена требо-

ваниями контроля герметичности, осуществляемого путем контроля давления в объеме, расположенном между двумя прокладками.

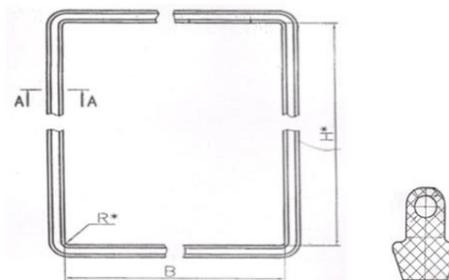


Рисунок 1. Уплотнение шлюза [составлено по рабочей конструкторской документации шлюза для шлюзов Нововоронежской АЭС-2]

Figure 1. Gateway sealing [compiled according to the working design gateway documentation for Novovoronezh NPP-2 gateways]

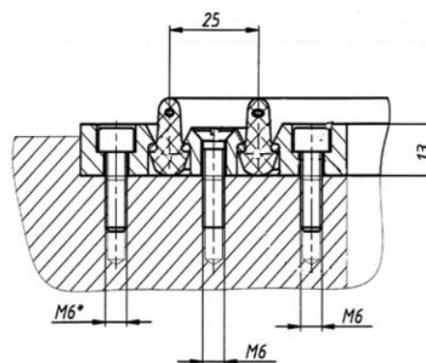


Рисунок 2. Установка уплотнений [составлено по рабочей конструкторской документации шлюза транспортного для Нововоронежской АЭС-2 (черт. АМЕ 720. 00.00.000СБ)]

Figure 2. Installation of seals [compiled according to the working design gateway documentation for Novovoronezh NPP-2 gateways (AME 720. 00.00.000SB drawing)]

При изготовлении и эксплуатации элементов ЛСБ возникает проблема неравномерного выступания двухрядного резинового уплотнения из пазов в полотне элемента ЛСБ, что приводит к необходимости уточнения интегрального усилия обжатия уплотнения в целом для этого элемента. Проблема вызвана несовершенством технологии изготовления полотен больших размеров для элементов ЛСБ (двери, люки, шлюзы: периметр уплотнений может достигать 10-20 м, диаметр полотна 2-6 м) и необходимостью

³ ТУ 38 1051325-2008 «Изделия резинотехнические для атомной техники». – Режим доступа: <https://niemi.ru/study/TU/tu-38-1051325-2008/> (дата обращения: 15.03.2024).

при этом выдерживать жесткие технологические требования по плоскостности, прямолинейности и предельным отклонениям по линейным и угловым размерам.

По требованиям чертежей предельные отклонения линейных размеров принимаются по ГОСТ 30893.12002⁴ (табл. 1), а допуски прямолинейности и плоскостности по ГОСТ 30893.22002⁵ (табл. 2).

Таблица 1. Предельные отклонения линейных размеров (размеры в мм) [составлено по ГОСТ 30893.1-2002]

Table 1. Limit deviations of linear dimensions (dimensions are given in mm) [compiled according to the GOST 30893.1-2002]

Класс точности	Предельные отклонения для интервала номинальных размеров					
	св. 400 до 1000	св. 1000 до 2000	св. 2000 до 4000	св. 4000 до 6000	св. 6000 до 8000	св. 8000 до 10000
Средний m	±0,8	±1,2	±1,2	± 3	± 5	± 8

Таблица 2. Общие допуски прямолинейности и плоскостности (размеры в мм) [составлено по ГОСТ 30893.2-2002]

Table 2. General straightness and flatness tolerances (dimensions are given in mm) [compiled according to the GOST 30893.2-2002]

Класс точности	Предельные отклонения для интервала номинальных размеров			
	св. 30 до 100	св. 100 до 300	св. 300 до 1000	св. 1000 до 3000
L	0,4	0,8	1,2	1,6

Величины предельных отклонений, указанные в таблицах 1 и 2, сравнимы с величинами обжатия прокладки для номинальных размеров полотен элементов ЛСБ, что может привести к необходимости увеличения усилия обжатия уплотнений. Изготовление габаритных конструкций усложняется наличием сварных соединений и последующей термообработкой, что может привести к короблению конструкции. Для контроля протечек воздуха использовался измеритель протечек, фрагмент принципиальной схемы которого приведен на рисунке 3.

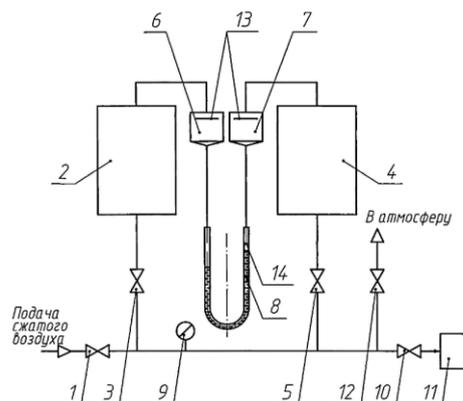


Рисунок 3. Фрагмент принципиальной схемы измерителя протечек [составлено по Патенту РФ: RU №129289 U1⁶]

Figure 3. A fragment of the leak meter schematic diagram [compiled according to the Russian Federation Patent: RU №129289 U1⁶]

⁴ ГОСТ 30893.1-2002 Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками. – Режим доступа: https://www.testprom.ru/img_user/gosts/17/040/gost_30893.1-2002.pdf (дата обращения: 15.03.2024).

⁵ ГОСТ 30893.2-2002 Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Допуски формы и расположения поверхностей, не указанные индивидуально. – Режим доступа:

https://www.testprom.ru/img_user/gosts/17/040/gost_30893.2-2002.pdf (дата обращения: 15.03.2024).

⁶ Патент РФ: RU №129289 U1, МПК от 09.01.2013. Устройство для измерения величины протечки газовой среды уплотнительных элементов локализирующих систем безопасности АЭС. Патентообладатели: Кравец Б.И., Кравец С.Б. Опубликовано 20.06.2013 Бюл. № 17. – Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU129289U1_20130620 (дата обращения: 15.06.2024).

Измеритель содержит запорный клапан 1, управляющий подачей сжатого воздуха к компенсационной камере 2 (через клапан 3) и измерительной камере 4 (через клапан 5). К камерам через расширители 6 и 7 подключен U-образный дифференциальный манометр 8 для измерения разности давления. При этом левый конец U-образной трубки подключен к расширителю 6, а правый – к расширителю 7. Между клапанами 3 и 5 подключен манометр для измерения давления, заданного по «программе испытаний». Клапан 10 подключен к испытываемому изделию 11. Клапан 12 подключен к атмосфере. В расширителях 6 и 7 установлены пластинки 13, выполняющие функцию отбойника при резком сбросе давления, заставляя жидкость возвращаться в дифманометр 8, не попадая в камеры. Мерное стекло 14 дифманометра заполнено окрашенной дистиллированной водой.

Измеритель протечек обеспечивал следующие характеристики:

- измерение расхода воздуха проводилось при постоянном давлении (имелся сосуд компенсации давления);

- высокая точность измерений протечек воздуха, ввиду измерения не самого давления воздуха, а перепада давлений между контролируемой полостью и зоной истечения;

- прямой метод измерения перепада.

В качестве нагружающего устройства, используемого для организации циклов нагружения с заданной скоростью и усилием, использовалась система, состоящая из гидроцилиндра, штоком механически связанного с нагружающей подвижной крышкой, осуществляющей вертикальную нагрузку на уплотнение, концевого клапана, сообщенного с напорным трубопроводом от насоса, и гидравлически связанного через дроссель с концевым клапаном, сообщенным со сливным трубопроводом.

Согласно ПНАЭ Г-7-002-86⁷ и ГОСТ Р 59115.16-2021⁸ нормативные требования

сформированы только для резиновых прокладок плоской формы. В настоящее время для резиновых прокладок, применяемых в качестве уплотнения транспортных шлюзов, нет не только нормативных требований, регламентирующих параметры этих уплотнений, но и отсутствуют рекомендации по расчету подобных прокладок в справочной литературе [1,2]. Согласно ТУ 38 1051325-2008 в число нормативных требований к резиновым прокладкам, приведенным в таблице 3, не включено минимальное усилие обжатия этой прокладки, обеспечивающее герметичность уплотнения. Следовательно, для обеспечения надежной работы уплотнений транспортных шлюзов, необходимо определить необходимые параметры, позволяющие обеспечить герметичность и работоспособность данных уплотнений на расчетный период эксплуатации.

С целью определения параметров, позволяющих выполнить расчетное обоснование герметичности узла уплотнения, были использованы результаты экспериментальных исследований ОАО «ВНИИАМ» г. Волгодонска, выполненных для данных резиновых прокладок [3]. В таблице 4 представлены приведенные в работе «Прогнозирование работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах» [3] результаты проверки работоспособности уплотнения (см. рис. 1), после выполнения циклов нагружения усилиями различной интенсивности.

издат, 1989. – 525 с. – Режим доступа: <https://www.gostrf.com/normadata/1/4293842/4293842075.pdf> (дата обращения: 14.03.2024).

⁸ ГОСТ Р 59115.16-2021 Национальный стандарт Российской Федерации. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на прочность разъемных соединений. – Москва: ФГБУ «РСТ», 2021. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200181934> (дата обращения: 15.03.2024).

⁷ Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. – Москва: Энергоатом-

Таблица 3. Требования к резиновым прокладкам [составлено по ПНАЭ Г-7-002-86 и ГОСТ Р 59115.16-2021]

Table 3. Rubber table requirements [compiled according to PNAE G-7-002-86 and GOST R 59115.16-2021]

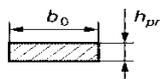
Конструкция прокладки 	Материал	Эффективная ширина b, мм	Воздух, пар, пароводяная смесь	
			m	q ₀ , МПа
	Резина твердая	b ₀	2,2	9

Таблица 4. Результаты испытаний на работоспособность прокладки [составлено авторами с использованием ранее полученных результатов [3]]

Table 4. Gasket operability test results [compiled by the authors using previously obtained results[3]]

Усилие обжатия, Н/мм	Исходное состояние		После наработки 2500 циклов		После наработки 5000 циклов	
	Обжатие, мм	Протечки, Па	Обжатие, мм	Протечки, Па	Обжатие, мм	Протечки, Па
3,74	0,99	негерм.>500 Па	0,9	негерм.>500 Па	0,91	негерм.>500 Па
6,88	1,45	негерм.>500 Па	1,39	негерм.>500 Па	1,54	40
10,02	2,0	40	1,99	50	2,21	40
13,16	2,42	40	2,33	40	2,45	40
1630	3,01	30	2,82	40	2,81	50
19,44	3,52	30	3,0	40	3,07	30
22,58	3,76	30	3,21	40	3,24	30
25,72	3,97	20	3,43	40	3,45	40
28,86	4,11	20	3,7	30	3,64	30
32,00	4,17	20	3,75	30	3,71	30

Обработка экспериментальных данных по испытанию работоспособности прокладки (см. рис. 2) после наработки 2500, 5000 циклов нагружения проведена с определением коэффициентов уравнения регрессии по методу наименьших квадра-

тов, описывающую зависимость величины обжатия $\delta_{\text{экс}}$ от усилия P по работам А.Д. Селютина [4], Дж. Тейлора [5], И.В. Митина и В.С. Русакова⁹ также по ГОСТ Р 8.997-2021¹⁰ и ГОСТ Р 8.736-2011¹¹.

Уравнение линейной регрессии (1) имеет вид:

$$\delta_{\text{экс}} = a_0 + a_1 \cdot P_{\text{экс}} + a_2 \cdot P_{\text{экс}}^2 \quad (1)$$

В случае прямо измеряемых величин $\delta_{\text{экс}}, P_{\text{экс}}$ получим формулы для коэффициентов линейной регрессии a_0, a_1, a_2 в

уравнении (1) приведены в [4-5]^{5,6,7}.

Коэффициент корреляции определяется по формуле (2):

⁹ Митин И.В., Русаков В.С. Анализ и обработка экспериментальных данных: учебно-методическое пособие для студентов младших курсов. – Москва : Физический Факультет МГУ. – 44 с. Режим доступа: <https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SHAMSHUT/study/labs/Tab1/I V Mitin V S Rusakov.pdf> (дата обращения: 12.03.2024).

¹⁰ ГОСТ Р 8.997-2021 Национальный стандарт Российской Федерации. Алгоритмы оценки метрологических характеристик при аттестации методик измерений в области исполь-

зования атомной энергии. – Москва: Стандартинформ, 2021. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200179190> (дата обращения: 14.03.2024).

¹¹ ГОСТ Р 8.736-2011 Национальный стандарт Российской Федерации. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2013. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016> (дата обращения: 15.03.2024).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \cdot (\delta_i - \bar{\delta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}}, \quad (2)$$

где $\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$, $\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}$ – средние величины усилия обжатия и величины обжатия соответственно.

Результаты расчета зависимости обжатия прокладки $\delta_{\text{расч}}$ от расчетного усилия про-

жатия $P_{\text{расч}}$ в режимах «Исходное состояние», «После наработки 2500 циклов», «После наработки 5000 циклов» приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты испытаний на работоспособность прокладки [составлено авторами]

Table 5. Gasket operability test results [compiled by the authors]

a_0 , мм	a_1 , мм/Н	a_2 , мм/Н ²	r
Исходное состояние			
0,0329	0,2363	-0,0033	0,974
После наработки 2500 циклов			
0,202	0,1995	-0,0028	0,975
После наработки 5000 циклов			
0,2752	0,2062	-0,0031	0,963

Экспериментальные зависимости величины прожатия (вертикальной деформации) уплотнения от погонного усилия при исходном состоянии, после наработки 2500 циклов и наработки 5000 циклов изображены

соответственно на рисунках 4, 5 и 6. Диапазон изменения погонной нагрузки: от 3,74 Н/мм до 32 Н/мм. Так как зависимость нелинейная, то можно пользоваться только интерполяцией внутри этого диапазона.

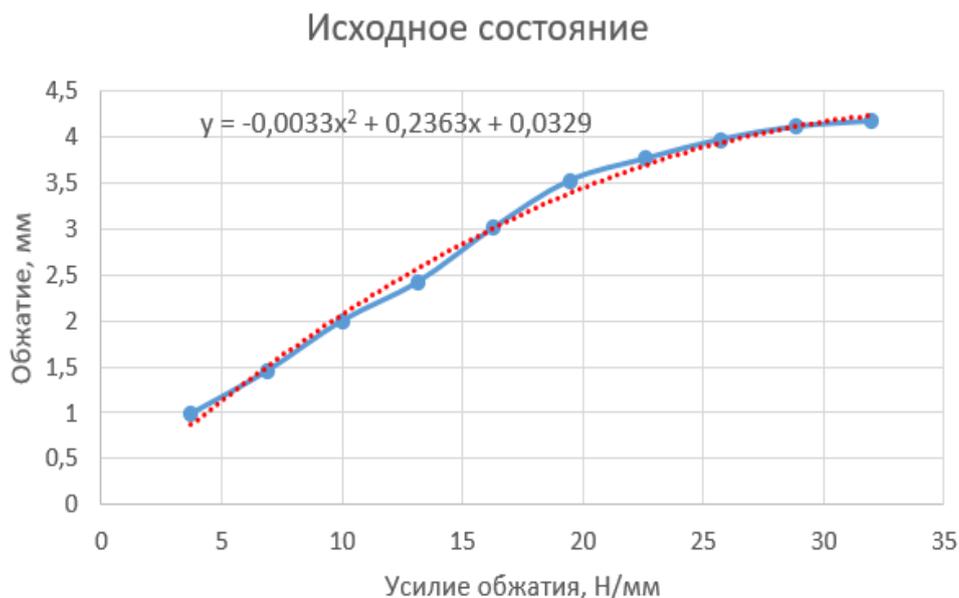


Рисунок 4. Экспериментальные зависимости величины прожатия в мм от погонного усилия Н/мм при исходном состоянии [составлено авторами]

Figure 4. Experimental dependences of the compression value in mm on the linear force N/mm at the initial state [compiled by the authors]

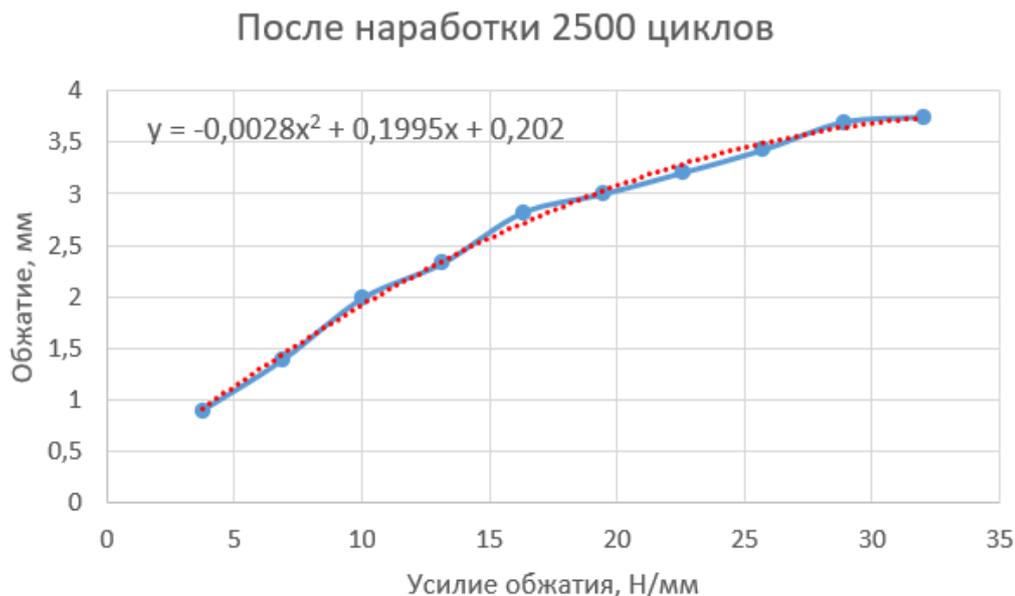


Рисунок 5. Экспериментальные зависимости величины прожатия в мм от погонного усилия Н/мм после наработки 2500 циклов [составлено авторами]
Figure 5. Experimental dependences of the compression value in mm on the linear force N/mm after 2500 cycles [compiled by the authors]

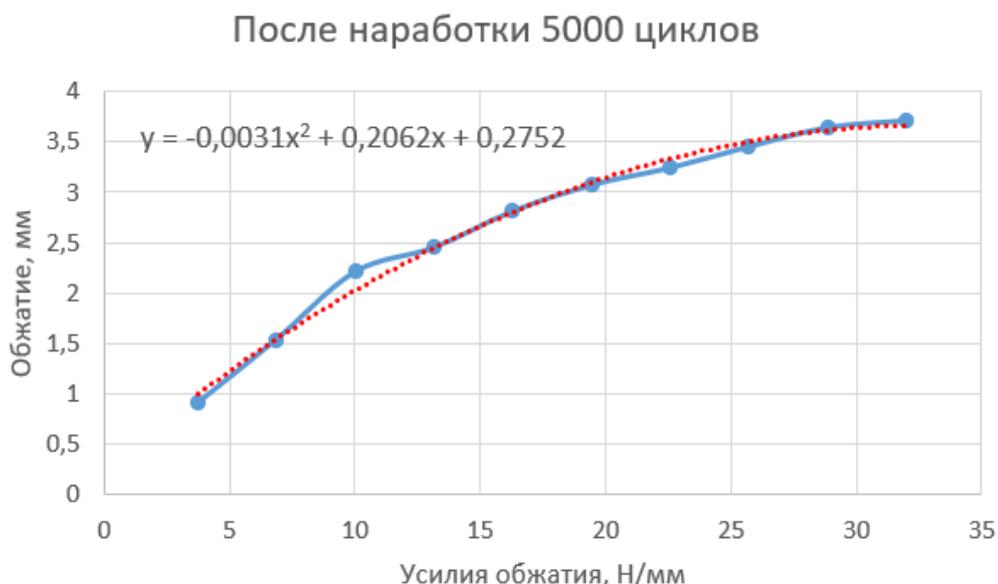


Рисунок 6. Экспериментальные зависимости величины прожатия в мм от погонного усилия кгс/мм после наработки 5000 циклов [составлено авторами]
Figure 6. Experimental dependences of the compression value in mm on the linear force kgf/mm after running 5000 cycles [compiled by the authors]

Расчет усилия обжатия прокладки был проведен по программе конечно-элементного анализа ANSYS¹². Для оценки

обжатия прокладки была построена трёх-мерная конечно-элементная модель прокладки, изображенная на рисунке 7.

¹² Расчетный комплекс ANSYS. Лицензия № 1070122. – Режим доступа: <https://cvs.spb.su/PAPERS/ANSYS-CVS.pdf> (дата обращения: 15.03.2024).

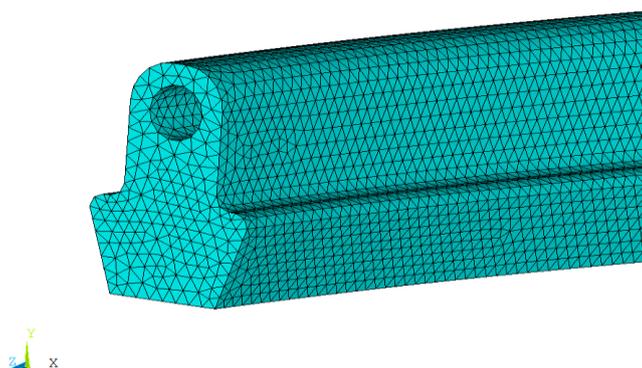


Рисунок 7. Трехмерная конечно-элементная модель прокладки [составлено авторами в программе ANSYS]

Figure 7. Three-dimensional finite element model of the gasket [compiled by the authors in ANSYS software]

При создании модели прокладки использовался конечный элемент SOLID92 (рис. 8), представляющий собой квадратичный элемент (II порядка), пригодный для моделиро-

вания нерегулярных сеток. Краткая характеристика элемент SOLID92: определяется десятью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле.

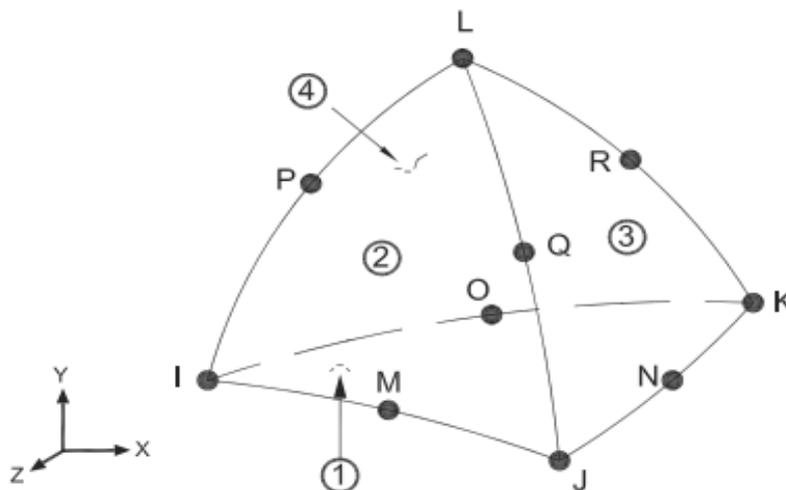


Рисунок 8. Конечный элемент SOLID 92 [составлено авторами в программе ANSYS]
Figure 8. SOLID 92 finite element [compiled according to the 10 GOST P 8.997-2021]

При построении расчетной модели прокладки были использованы следующие характеристики резины: $E = 0,9 \cdot 10^7$ Па – модуль упругости; $\mu = 0,46$ – коэффициент Пуассона. Для выбора и оптимизации параметров конечно-элементной модели, в том числе достаточности густоты конечно-элементной сетки, были выполнены предварительные расчёты. Оптимальные размеры

конечно-элементной сетки были приняты для модели сетки, увеличение числа элементов которой дало изменение вычислений не более 3%. Результаты сравнения результатов расчетов, выполненных в программе ANSYS, с экспериментальными данными, представленными в ГОСТ Р 59115.16-2021, приведены в таблице 6 и на рисунке 9.

Таблица 6. Значения прожатия (вертикальной деформации) уплотнения в зависимости от усилия обжатия [составлено авторами]

Table 6. Values of compression (vertical deformation) of the seal depending on the compression force [compiled by the authors]

Усилие обжатия, Н/мм	При испытаниях после 1 цикла в исходном состоянии	В программе ANSYS после 1 цикла в исходном состоянии
	Обжатие, мм	
3,74	0,99	1,02
6,88	1,45	1,55
10,02	2,00	2,11
13,16	2,42	2,64
16,30	3,01	3,21
19,44	3,52	3,68
22,58	3,76	3,95
25,72	3,97	4,14
28,86	4,11	4,29
32,00	4,17	4,35

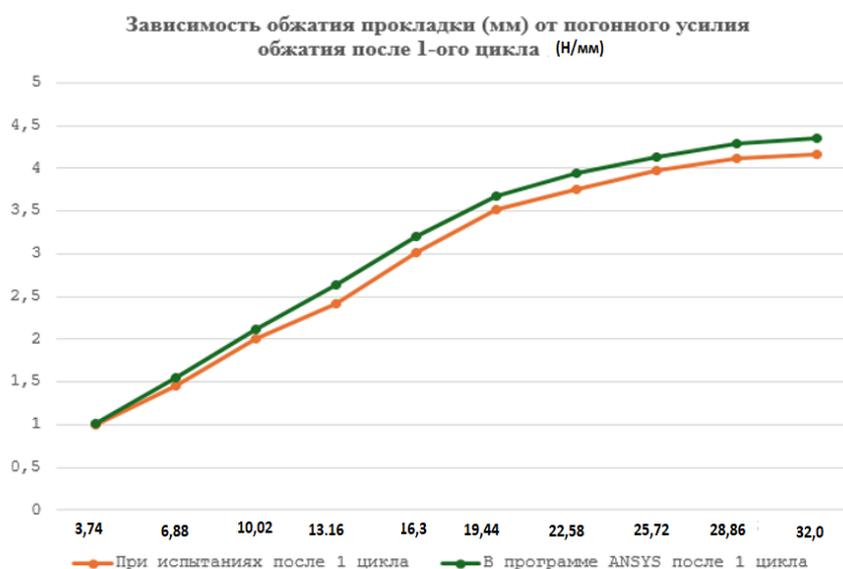


Рисунок 9. Сравнение результатов [составлено авторами]
Figure 9. Comparison of results [compiled by the authors]

Выводы

1. Результаты выполненного расчетно-экспериментального обоснования работоспособности уплотнений элементов ЛСБ показали, что зависимость величины прожатия уплотнения от заданной нагрузки близка к линейной, но наиболее хорошо описывается полиномом второй степени. Использование данной зависимости позволит наиболее точно определить напряженно-деформирован-

ное состояние не только узла уплотнения, но и уплотняемых элементов за счет учета уточненных усилий обжатия прокладок.

2. Предложенная авторами методика построения расчетной модели уплотнения позволяет получить корректную модель, так как полученные результаты зависимости величины прожатия от заданной нагрузки по программе ANSYS достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б. [и др.]. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. Москва: Машиностроение, 1986. 464 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/TG1jACnmr6duW?ysclid=1wyugt44ba690681962> (дата обращения: 15.03.2024).

Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B. [et al]. Seals and sealing equipment: Reference books. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 464 p., Available at: <https://djvu.online/file/TG1jACnmr6duW?ysclid=lwyugt44ba690681962> (accessed: 15.03.2024).

2. Макаров В.Г. Уплотнительные устройства. Ленинград: Машиностроение, 1973. 232 с. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/19301162/> (дата обращения: 25.03.2024).

Makarov V.G. Sealing devices. Leningrad: Mashinostroenie, 1973. 232 p. Available at: <https://studfile.net/preview/19301162> (accessed: 25.03.2024).

3. Кузин С.А., Кравец С.Б., Парыгин Е.В., Краснокуцкий В.В. Прогнозирование работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;45(4):61–68 <https://doi.org/10.26583/gns-2022-04-06>

Kuzin S.A., Kravets S.B., Parygin E.V., Krasnorutsky V.V. Forecasting the operation of sealing joints of transport locks of WWER-1000 and WWER-1200 power units in operational modes. *Global Nuclear Safety*. 2022;45(4):61–68 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2022-04-06>

4. Селютин А.Д. Аппроксимация полиномов n степени методом наименьших квадратов. *Молодой ученый*. 2018;16(202):91–95. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/202/> (дата обращения: 12.03.2024).

Selyutin A.D. Approximation of n -degree polynomials by the least squares method. *A young scientist*. 2018;16(202):91–95. Available at: <https://moluch.ru/archive/202/> (accessed: 12.03.2024).

5. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Перевод с англ. Москва: Мир, 1985. 272 с. Режим доступа: <https://studizba.com/files/show/djvu/2333-1-dzh-teylor--vvedenie-v-teoriyu-oshibok.html> (дата обращения: 12.03.2024).

Taylor J. Introduction to the theory of errors. Translation from English. Moscow: Mir, 1985, 272 p. Available at: <https://studizba.com/files/show/djvu/2333-1-dzh-teylor--vvedenie-v-teoriyu-oshibok.html> (accessed: 12.03.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

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

Кузин С.А. – анализ результатов эксперимента и результатов расчета по МКЭ;

Сапельников В.М. – выполнение расчетов по МКЭ и разработка рекомендаций;

Синельщикова С.Е. – выполнение расчетов по МКЭ и разработка рекомендаций;

Поволоцкая А.А. – обработка результатов и разработка рекомендаций;

Бекетов В.Г. – анализ результатов расчета по МКЭ.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

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

Kuzin S.A. – analysis of experimental results and FEM calculation results;

Sapelnikov V.M. – performing FEM calculations and developing recommendations;

Sinelschikova S.E. – performing FEM calculations and developing recommendations;

Povolotskaya A.A. – processing of results and development of recommendations;

Beketov V.G. – analysis of calculation results using FEM.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Борисович Кравец, доктор технических наук, профессор, начальник отдела надежности и качества, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Российская Федерация.

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

e-mail: kravets_sb@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey B. Kravets, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Reliability and Quality Department, National Technical Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Сергей Алексеевич Кузин, кандидат технических наук, ведущий конструктор, АО «Атоммашэкспорт»; доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Вячеслав Михайлович Сапельников, кандидат химических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5792-5344>

e-mail: vsapelnikov@yandex.ru

Софья Евгеньевна Синельщикова, студент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: VITikafAE@mephi.ru

Анастасия Александровна Поволоцкая, студент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: VITikafAE@mephi.ru

Владимир Георгиевич Бекетов, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-6745>

e-mail: VGBeketov@mephi.ru

Sergey A. Kuzin, Cand. Sci. (Engin.), leading designer, JSC Atommasheexport; Associate Professor, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

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

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Vyacheslav M. Sapelnikov, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5792-5344>

e-mail: vsapelnikov@yandex.ru

Sofya E. Sinelshchikova, student, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: VITikafAE@mephi.ru

Anastasia Alexandrovna Povolotskaya, student, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: VITikafAE@mephi.ru

Vladimir G. Beketov, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-6745>

e-mail: VGBeketov@mephi.ru

Поступила в редакцию 28.03.2024

После доработки 03.06.2024

Принята к публикации 11.06.2024

Received 28.03.2024

Revision 03.06.2024

Accepted 11.06.2024

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

УДК 621.9

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-05>

EDN KAUSKN

Оригинальная статья / Original paper



Оптимизация программно-управляемой механической обработки
ответственных деталей трубопроводной арматуры

К.А. Винныйчук¹, А.А. Моисеенко², Н.Н. Подрезов¹  , С.А. Томилин¹ 

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

²Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация
 NNPodrezov@mephi.ru

Аннотация. В последнее время постоянно происходит ужесточение требований к качеству трубопроводной арматуры для АЭС, объектов нефтегазового хозяйства, что связано с обеспечением ресурса их безопасной эксплуатации. При изготовлении деталей с применением технологий вычитания механообработкой особое значение придается показателям точности линейно – угловых размеров и формы поверхностей. В данном исследовании рассмотрены пути оптимизации размерной токарной обработки на примере детали «сепаратор» на многофункциональном токарно-фрезерном центре с ЧПУ MULTICUT 630/2000S. Операции проектирования и оптимизации изготовления деталей все больше определяются результатами имитационного моделирования, виртуальными моделями, которые, по сути, являются неотъемлемой частью технологических процессов. В данной работе имитационное моделирование выполнялось на тренажерах с УЧПУ Sinumerik 810/840D/Operate Turn. Эта процедура представляет собой упрощенный вариант алгоритма отсечения Вейлера–Азертонна применительно к токарной обработке снятия припуска. В дополнение к алгоритму предложены дополнительные модули динамических коррекций управляющих программ с целью гарантированного обеспечения требований конструкторской документации по точности в условиях динамической системы СПИД: станок – приспособление – инструмент – деталь. Из технологических управляющих параметров наибольшее влияние на процесс снятия припуска оказывают скорость резания, далее глубина резания и подача инструмента при токарной обработке. Модули динамических коррекций управляющих программ позволяет достаточно точно оценить влияние управляющих факторов в токарной обработке (скорости резания, глубины резания и подачи) на силу резания и точность обработки.

Ключевые слова: размерная точность, система СПИД, токарная обработка, системы с ЧПУ 810/840D/Operate, безопасность АЭС, нейросети, MULTICUT, атомное машиностроение, оптимизация, искусственный интеллект, алгоритм Вейлера – Азертонна.

Для цитирования: Винныйчук К.А., Моисеенко А.А., Подрезов Н.Н., Томилин С.А. Оптимизация программно-управляемой механической обработки ответственных деталей трубопроводной арматуры. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):52–60. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-05>

For citation: Vinnichuk K.A., Moiseenko A.A., Podrezov N.N., Tomilin S.A. Optimization of software-controlled machining of critical pipe fittings. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):52–60 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-05>

Optimization of software-controlled machining of critical pipe fittings

Kseniy A. Viniyчук¹, Aleksey A. Moiseenko², Nikolay N. Podrezov¹ ,
Sergey A. Tomilin¹  

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

² «Atomash» the branch of «AEM-technologies» JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
 NNPodrezov@mephi.ru

Abstract. The quality requirements for pipeline fittings for NPPs and oil and gas facilities have become more stringent recently, which is related to ensuring their safe operation life. When manufacturing parts using subtractive machining technologies, special importance is attached to accuracy indicators of linear-angular dimensions and surface shapes. This study examines ways to optimize dimensional turning using the example of a “separator” part on a multifunctional CNC turning and milling center MULTICUT 630/2000S. Operations of designing and optimizing the production of parts are increasingly determined by the results of simulation modelling, virtual models, which, in fact, are an integral part of technological processes. In this work, simulation modelling is performed on simulators with CNC Sinumerik 810/840D/Operate Turn. This procedure is a simplified version of the Weiler-Atherton clipping algorithm as applied to stock removal turning. In addition to the algorithm, additional modules for dynamic corrections of control programs are proposed in order to guarantee the requirements of design documentation for accuracy in the conditions of a dynamic SPID system: machine – fixture – tool – part. The cutting speed, depth of cut and tool feed in turning have the greatest influence on the stock removal process from the technological control parameters. Modules of dynamic corrections of control programmes allow to estimate quite accurately the influence of control factors in turning (cutting speed, depth of cut and feed) on cutting force and machining accuracy.

Keywords: dimensional accuracy, SPID system, 810/840D/Operate Turn CNC, turning, nuclear power plant safety, neural networks, MULTICUT, nuclear engineering, optimization, artificial intelligence, Weiler – Azerton algorithm.

Введение

Современная обрабатывающая промышленность в атомном машиностроении требует быстрых и экономически эффективных методов проектирования и производства новой продукции небольшими партиями. В традиционном субтрактивном производстве, к которому все больше требований по обеспечению точности и эффективности, невозможно существенное улучшение обоих показателей без понимания и моделирования динамических процессов резания в системе СПИД: станок – приспособление – инструмент – деталь или предложенной в [1] ДИПС: деталь – инструмент – приспособление – станок.

Операции проектирования и оптимизации изготовления деталей все больше определяются результатами имитационного моделирования, виртуальными моделями, которые, по сути, являются неотъемлемой частью технологических процессов [2,3].

В работе рассмотрены алгоритмы дополнительных коррекций управляющих программ с целью гарантированного обеспечения требований конструкторской документации к деталям по точности в условиях динамической системы СПИД. Правильно выбранные и рассчитанные алгоритмы визуализации снятия припуска при виртуальном точении оказывают решающее значение на качество моделирования и симуляции программно – управляемой токарной обработки.

Анализ технологичности

По конструкторской документации деталь «сепаратор» (рис. 1), представляет собой цилиндрическую оболочку из стали 20ХН3А толщиной 25 мм диаметром 500 мм, перфорированную 406-тью отверстиями диаметром 18 мм. Наиболее ответственными и сложными по точности механообработки являются поверхности пазов и выемки поз. Г, Д под прокладочные материалы, обеспечивающие герметичность сепаратора с от-

ветными поверхностями ходовой части клапана арматуры.

К элементам сепаратора выноски D , (центрирующая выемка, канавка призматическая, рис. 1), предъявляются наиболее высокие требования по размерной точности и радиальному биению (рис. 2). Следуя общим правилам и по маршрутному технологическому процессу, указанные точные поверхности выполняются токарной обработкой в последнюю очередь.

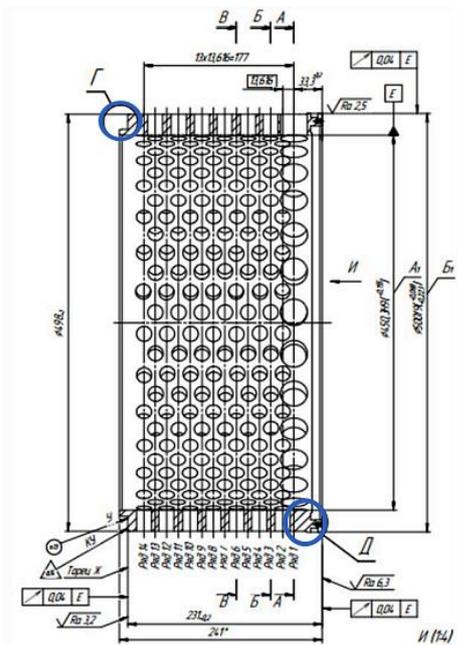


Рисунок 1. Требования по точности к детали «сепаратор»

Figure 1. Accuracy requirements for the «separator» part

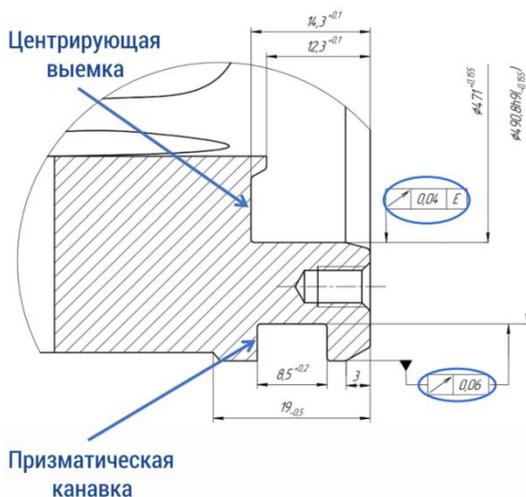


Рисунок 2. Наиболее точные поверхности сепаратора

Figure 2. The most accurate separator surfaces

Также следует учесть, что к этому моменту у перфорированного цилиндра значительно меньше момент инерции и момент сопротивления сечения¹ за счет наличия большого количества отверстий. Это приводит к резкому уменьшению жесткости сепаратора, а эквивалентная по жесткости толщина стенки сепаратора без отверстий уменьшится до значений менее 1/20 от радиуса сепаратора.

Как известно², цилиндрические оболочки с указанным соотношением относятся к тонкостенным и к ним обязательно применяются дополнительные меры повышения технологичности при механообработке. Другими словами, размерная обработка элементов, (см. рис. 2), является непростой задачей, несмотря на кажущуюся простоту, что и наблюдается на практике.

Анализ причин погрешностей в системе СПИД

Выбор решений по повышению технологичности сопряжен со следующими основными трудностями [4]:

- недетерминированностью процесса механообработки и влиянию на точность детали многих возмущений и погрешностей, возникающих в системе СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь);

- стохастичностью собственно процесса обработки по физической сущности, «нечеткости» получаемой информации, в том числе и для адаптивных систем с ЧПУ.

К этому добавим учет технологического наследования, под которым понимается явление переноса свойств объектов от предшествующих операций к последующим [5]. Сохранение переносимых свойств у объектов

¹ Галеев Г.Б., Новиков Н.Е. Определение допустимых напряжений и запасов прочности в машиностроении : учебное пособие. – Ленинград : ЛТА, 1972. 61 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007242110> (дата обращения: 28.03.2024).

² Марцулевич Н.А., Мильченко А.И., Луцко А.Н. и др. Механика : учебное пособие. – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2008. – 295 с. Режим доступа: <https://technolog.edu.ru/public/userfiles/files/120/Mehanika.pdf> (дата обращения: 28.03.2024).

называется технологической наследственностью как в процессе, так и по завершению механообработки.

Возможные причины возникновения погрешностей в системе СПИД при токарной обработке заготовок представлены на рисунке 3.

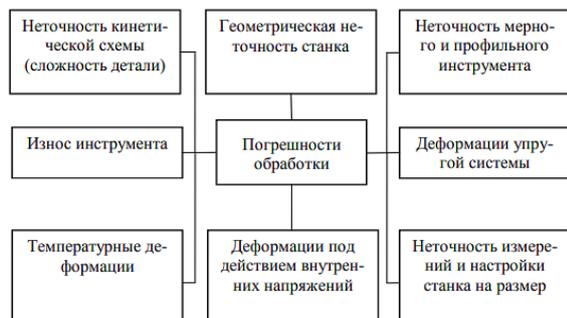


Рисунок 3. Причины погрешностей в СПИД токарной обработки³

Figure 3. Causes of errors in the turning process³

Как показал эксперимент (рис. 4), наибольшее влияние на динамику процесса резания в системе СПИД оказывают режимы снятия припуска и обрабатываемый материал [6].

Значимость каждого параметра оценивалась на основе сравнения сигнала, генерируемого обученной нейронной сетью с исследуемым параметром на входе и с сигналом, генерируемым нейронной сетью без исследуемого параметра на входе. Как следует из гистограммы (рис. 4), из технологических управляющих параметров наибольшее влияние оказывают скорость резания, далее глубина резания и подача инструмента при токарной обработке.

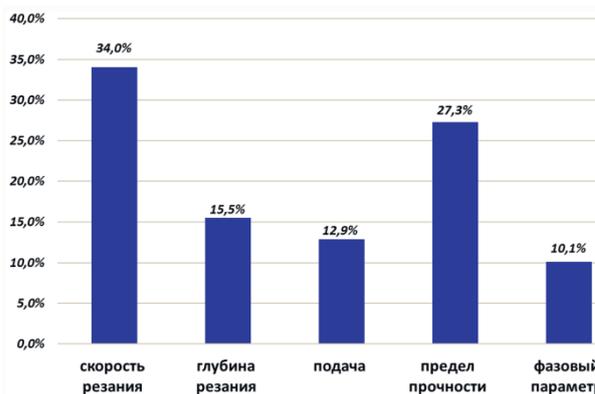


Рисунок 4. Значимость управляющих параметров при механической обработке [8]

Figure 4. Significance of control parameters in machining operations [8]

Обеспечение точности детали «сепаратор»

В рамках разработки нового техпроцесса был осуществлен переход к одностаночному варианту обработки детали. Для этого вместо ранее применявшихся горизонтально-расточного Prima, токарно-карусельного ТКВ-2000М, токарно-винторезного 1М63 применили закупленный в рамках цифровизации многофункциональный токарно-фрезерный центр с ЧПУ MULTICUT 630/2000S (рис. 5). Представляющие интерес основные технические характеристики станка приведены в таблице 1.



Рисунок 5. Токарно-фрезерный центр с ЧПУ MULTICUT 630/2000S

Figure 5. CNC turning and milling center MULTICUT 630/2000S

³ Шелихов Е.С., Сергеев А.И. Исследование погрешности токарной обработки нежёстких валов на станках с ЧПУ : методические указания. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 32 с. Режим доступа:

<http://elib.osu.ru/bitstream/123456789/12459/1/Шелихов.pdf> (дата обращения: 28.03.2024).

Таблица 1. Основные характеристики MULTICUT 630**Table 1.** Main characteristics of MULTICUT 630

Технические характеристики, ед. измерения	Значения
Количество одновременно управляемых координат станка	5
Мощность двигателя главного привода, кВт	43
Диаметр обработки над направляющим, мм	1150
Максимальная длина точения, мм	2100
Расстояние между центрами станка, мм	2400
Максимальное число оборотов в минуту мин ⁻¹	12 000
Максимальная длина/масса инструмента, мм/кг	500/12
Стойка управления ЧПУ	Sinumerik 840D SL
Габариты Д x Ш x В, мм	8800/5150/3100
Масса станка, кг	20000

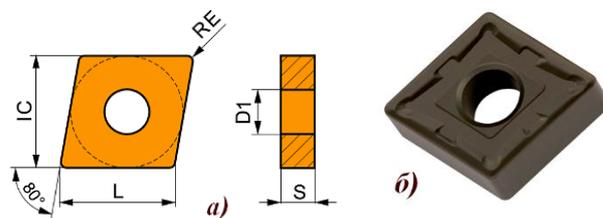
Модель MULTICUT 630/2000S оснащена кондршпинделем с функцией задней бабки. Преимущества станка MULTICUT в сравнении с многостаночным вариантом для детали «сепаратор» очевидны: обработка с одного установка, сокращение итогового времени обработки более чем в 4 раза, исключение межоперационных простоев, сокращение количества инструментов и времени наладки, высокие характеристики точности станка.

Тем не менее, широко бытующее мнение, что обеспечить высокую точность обработки можно только за счет высокоточных станков является ошибочным [5]. Причина проста – кроме элемента «станок» в системе СПИД есть ещё три – приспособление, инструмент, деталь. В частности, из вышеприведенного анализа технологичности сепаратора следует, что у самой детали податливость к упругим деформациям наибольшая в системе СПИД токарной обработки. Отсюда следует вывод, что для тонкостенных оболочковых деталей требуется приспособление для увеличения жесткости детали. Одно из таких приспособлений с выносной базой и разжимными секторами приведено в российском патенте [7].

Для разработанной технологии токарной обработки на станке MULTICUT 630/2000S чешской фирмы KOVOSVIT–MAS применялся сборный инструмент со сменными неперетачиваемыми пластинами (СНП) также чешской компании PRAMET. Основные требования для инструмента с СНП – достаточная жесткость и, как следствие, обеспечение устойчивого режима снятия припуска без вибраций и автоколебаний, перегрева

зоны резания. Выбор СНП осуществляли по материалу, скорости и глубине резания, подаче инструмента – то есть по управляющим параметрам токарной обработки. Например, на рисунке 6 изображена СНП с кодировкой CNMG 190608E – M T9335 под державку PRAMET A325 – PCLNR 12 для чернового и чистового точения заготовок из конструкционной стали 20ХНЗА.

Полное описание СНП состоит из двадцати характеристик, а сокращенное выглядит так: двухсторонняя негативная пластина для токарной обработки с углом 80° ромбическая, с диаметром вписанной окружности 19.05 мм, толщина $S = 6.35$ мм, радиус при вершине $RE = 0.8$ мм, точность по ISO M, стружколомающая геометрия M, закругленные режущие кромки, сплав T9335, покрытие MT-CVD, функционально-градиентный субстрат WC-Co, применение по ISO P20 – P45.

**Рисунок 6.** Сменная неперетачиваемая пластина PRAMET CNMG 190608E – M T9335

a) схематичное изображение пластины; б) 3D модель пластины.

Figure 6. Replaceable non-sharpening insert PRAMET CNMG 190608E – M T9335

a) schematic representation of the plate; b) 3D model of the plate

Таким образом, для предупреждения отказов, повышенного износа и поломки ин-

струмента важно соблюдать рекомендации, знать каталоги, маркировку и другую информацию по инструментальной продукции от фирмы-поставщика.

Имитационное моделирование

В современных станочных системах с числовым программным управлением неотъемлемым элементом технологического процесса механической обработки снятия припуска являются средства имитационного моделирования управляющих программ. Цель имитационного моделирования – визуализация и проверка управляющих программ (УП) на ошибки с последующим их устранением и перепрограммированием УП механообработки. Следовательно, функциональные возможности программ симуляторов или верификаторов УП полностью определяются библиотеками ошибок и модулями коррекций техпроцесса механообработки.

В данной работе имитационное моделирование УП выполнялось на базе тренажеров фирмы EMCO с УЧПУ Sinumerik 810/840D/Operate Turn. В традиционной комплектации программное обеспечение тренажеров позволяет решать следующие задачи:

- программирование операций токарной обработки в стандартных G/M кодах и проверку УП на синтаксические и технологические ошибки;
- визуализация 3D моделей основных узлов оборудования, инструмента, процесса формообразования детали по УП, траекторий перемещения режущей точки инструмента в рабочей плоскости станка;
- интерактивное взаимодействие пользователя с имитационной моделью процесса.

Дополнительно программировали и верифицировали токарную обработку с одного установка детали «сепаратор» выполняли в программном пакете SprutCAM v.17. Фрагмент УП в операторных кодах приведен ниже.

```
N10 G54 Cylinder
N20 CONTOUR1
N30 T=ROUGHING_T80 A f=0.35/rev
U=160m
N40 T=FINISHING_T35 A F=0.2/rev
u=225m
```

```
N50 T=DRIL_5 F=0.05/rev s=1273REV
N60 CONTOUR2
N70 T=ROUGHING_T80 A f=0.35/rev
U=160m
N80 T=PLUNGE_CUTTER_3 A
F=0.18/rev
N90 CONTOUR3
N100 T=PLUNGE_CUTTER_3 A
FX00.13/rev
N110 T=PLUNGE_CUTTER_3 A
F0.18/rev U80m
N120 CONTOUR4
N130 T=FINISHING_T35 A F=0.18/rev
U=70m
N140 BACK_CONTOUR1
N150 T=FINISHING_T35 A F=0.1/rev
u=250m
N160 T=PLUNGE_CUTTER_3 A Tool
change pt.
N170 T=PLUNGE_CUTTER_3 A
F=0.1/rev
N180 F1=5000/min X1=30
N190 Turning T=PLUNGE_CUTTER_3P
S1=4000rev
N200 RAPID X30 Z-10
```

Отметим, что в применяемых в данной работе системах имитационного моделирования изначально применяется упрощенная модель формообразования детали, основанная на допущении о постоянстве осевой симметрии детали «сепаратор». Это означает, что в системе СПИД во время токарной обработки полностью отсутствуют упругие деформации. Основные вычисления по данной методике формализованы геометрической задачей пересечения двух плоских замкнутых контуров в рабочей плоскости станка – контура (полигона) обрабатываемой детали и контура (полигона) режущего инструмента. На основе формообразующего контура, представляющего собой логическую разность при пересечении двух исходных не самопересекающихся контуров (полигонов), образуется трёхмерная поверхность моделируемой детали путём равномерного поворота формообразующего контура вокруг главной оси станка, совпадающей с осью вращения обрабатываемой заготовки в деталь. Данная процедура представляет собой упрощенный вариант алгоритма отсечения Вейлера–Азертонна применитель-

но к токарной обработке и подробно изложена в [8].

В работе изучена возможность применения алгоритма отсечения Вейлера–Азертонна для неосесимметричной детали, т.е. с изгибом оси заготовки в процессе токарной обработки, что соответствует учету сил резания и упругих деформаций в динамической системе СПИД. Это достигается моделированием обработки не в одной плоскости вращения заготовки за один оборот вращения шпинделя, а в нескольких, как показано на (рис. 7)

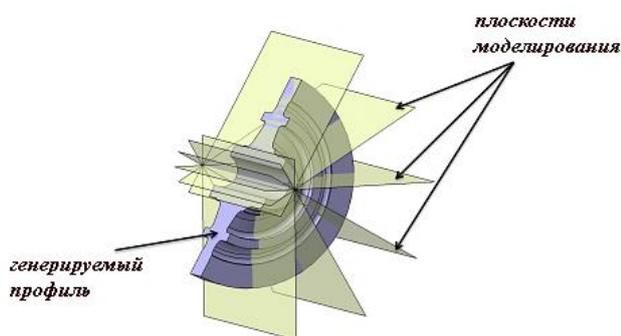


Рисунок 7. Плоскости моделирования на один оборот вращения шпинделя

Figure 7. Multiple simulation planes per spindle revolution

Моделирование заготовки, имеющей неосесимметричные элементы, требует шагов моделирования, меньших по времени, чем период вращения шпинделя, чтобы уловить изменения и сгенерировать профиль,

Рис.7, несколько раз в течение одного оборота шпинделя. Каждая из плоскостей моделирования представляет собой плоскость обработки при вращении шпинделя. Сечения инструмента и детали моделируются поликривыми, которые состоят из серии дуг и линий. Геометрии инструмента и детали пересекаются с помощью логических операций для получения условий взаимодействия в каждой плоскости моделирования. Данный подход позволяет достаточно точно оценить влияние управляющих факторов в токарной обработке (скорости резания, глубины резания и подачи) на силу резания и точность обработки.

Заключение

В данной работе показаны пути оптимизация программно-управляемой механической обработки ответственных деталей арматуры для АЭС, объектов нефтегазового хозяйства на примере разработки технологии механообработки детали «сепаратор». Применение современных элементов системы СПИД и программно-управляемых технологий в сочетании с системами имитационного моделирования, дополненных модулями динамических коррекций управляющих программ, приводит к увеличению производительности и повышению точности механообработки станков с ЧПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кравченко П.Д. Целесообразность применения мобильного технологического оборудования при изготовлении изделий атомного машиностроения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015;2(2/15):30–34. Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf?ysclid=lximof354e103576396 (дата обращения: 28.03.2024).
Kravchenko P.D. The expediency of using mobile technological equipment in the manufacture of nuclear engineering products. *Global nuclear Security*. 2015;2(2/15):30–34. Available at: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gns_15.pdf?ysclid=lximof354e103576396 (accessed: 28.03.2024).
2. Wang Q., Fu R., Hu Y., He J. Development of simulation platform for CNC intelligent manufacturing. In: International Conference on Control Science and Electric Power Systems. 2021. P. 184–189. Available at: <https://www.computer.org/csdl/proceedings-article/cseps/2021/261800a184/1wiQJX5GHD2> (accessed: 28.03.2024).
3. Mujber T.S., Szecsi T., Hashmi M.S.J. Virtual reality applications in manufacturing process simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, Vol. 155–156, pp. 1834–1838. Available at: <https://colab.ws/articles/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.401?ysclid=lxin4hc269315133113> (accessed: 28.03.2024).

4. Геиценредер А.А. Мониторинг станков при интеллектуальном управлении на базе нечеткой логики. Мехатроника. Робототехника. Автоматизация: Сборник научных трудов. Выпуск № 1. Москва: МГУПИ, 2006. С. 29–35. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_9ac45f6153bb9b35ded85fdbceba0ce1/?ysclid=lxijh6wlv663594580 (дата обращения: 28.03.2024).

Geitsenreder A.A. Monitoring of machine tools with intelligent control based on fuzzy logic. Mechatronics. Robotics. Automation Collection of Scientific Proceedings. Issue No.1. Moscow: MGUPI, 2006. P. 29–35. Available at: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_9ac45f6153bb9b35ded85fdbceba0ce1/?ysclid=lxijh6wlv663594580 (accessed: 28.03.2024).

5. Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С. [и др.] Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. Научное издание. Москва: Издательство МАИ, 2000. 364 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/uerasp> (дата обращения: 28.03.2024).

Dalsky A.M., Bazrov B.M., Vasiliev A.S. [et al.] Technological heredity in machine-building production. Moscow: Publishing House of MAI, 2000. 364 p. Available at: <https://elibrary.ru/uerasp> (accessed: 28.03.2024).

6. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В., Кузьмишина А.М., Аносов М.С. Искусственный интеллект и киберфизических механообрабатывающие системы в цифровом производстве. Нижний Новгород: Нижегородский ГТУ им. Р.А. Алексеева, 2020. 328 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41830023> (дата обращения: 28.03.2024).

Kabaldin Y.G., Shatalin D.A., Kolchin P.V., Kuzmishina A.M., Anosov M.S. Artificial intelligence and cyberphysical machining systems in digital manufacturing. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.A. Alekseev, 2020. 328 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41830023> (accessed: 28.03.2024).

7. Бахно А.Л., Чуприков А.О., Курочкин В.В. Способ закрепления полых цилиндрических изделий на токарном станке. Патент 727432. Российская Федерация. СПК В23В31/40/. ПАО «Тульский оружейный завод». № 2019138088; заявл.25.11.2019; опубл. 21.07.2019. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2727432C1_20200721 (дата обращения: 28.03.2024).

Bakhno A.L., Chuprikov A.O., Kurochkin V.V. Method of fixing hollow cylindrical products on a lathe. Pat.727432. Russian Federation. SEC B23B31/40/. PJSC Tula Arms Factory. No. 2019138088; application no. 25.11.2019; publ. 07.21.2019. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2727432C1_20200721 (accessed: 28.03.2024).

8. Gökçe Harun – Object Modeling Based Polygon For 3D CNC Lathe Simulation Softwares. *Journal of Polytechnic*. 2016;19(2):155–161. Available at: <https://avesis.gazi.edu.tr/yayin/7ba891be-e7b4-4d58-bc3a-d27cedfc688d/object-modeling-based-polygon-for-3d-cnc-lathe-simulation-softwares> (accessed: 28.03.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Винийчук К.А. – разработка методической части исследований, выполнение экспериментальных работ;

Моисеенко А.А. – организация и разработка исследовательской части и экспериментальных работ;

Подрезов Н.Н. – научное руководство проектом, обработка и анализ экспериментальных данных, подготовка заключения и результатов исследования к опубликованию;

Томилини С.А. – ресурсное обеспечение экспериментального исследования, участие в экспериментах.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Viniychuk K.A. – development of the methodological part of the research, organization and implementation of experimental work;

Moiseenko A.A. – organization and development of the research part and experimental work;

Podrezov N.N. – scientific management of the project, processing and analysis of experimental data, preparation of a conclusion and research results for publication;

Tomilin S.A. – resource support for experimental research, participation in experiments.

FUNDING:

No additional finding is involved in the research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ксения Александровна Винийчук, студент кафедры машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: VITikafMPM@mephi.ru

Алексей Анатольевич Моисеенко, руководитель направления по механической обработке, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: moiseenko_aa@atomash.ru

Николай Николаевич Подрезов, к.т.н., доцент кафедры машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0314-2413>

e-mail: NNPodrezov@mephi.ru

Сергей Алексеевич Томилин, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Kseniy A. Viniyчук, student, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: VITikafMPM@mephi.ru

Aleksey A. Moiseenko, head of Mechanical Processing, «Atomash» the branch of «AEM-technologies» JSC in Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: moiseenko_aa@atomash.ru

Nikolay N. Podrezov, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0314-2413>

e-mail: NNPodrezov@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.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8661-8386>

e-mail: SATomilin@mephi.ru

Поступила в редакцию 01.04.2024

После доработки 31.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

Received 01.04.2024

Revision 31.05.2024

Accepted 04.06.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5:621.18

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-06>

EDN KKDMXX

Оригинальная статья / Original paper



Методы и средства обеспечения точности измерений изгибных деформаций стыковочного патрубка между реактором ВВЭР и парогенератором в условиях топливной кампании

Ю.В. Красников¹ , В.П. Поваров² , А.М. Степанов¹ , С.Г. Фиш³  

¹ ООО «ИНЖЕНЕРНОЕ БЮРО ВАСО», г. Воронеж, Российская Федерация

² Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»
(Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация

³ ООО «РЕСУРС», г. Воронеж, Российская Федерация

 stasfish@mail.ru

Аннотация. Зона сварного соединения № 111 представляет собой узел приварки «горячего» коллектора теплоносителя первого контура к патрубку DN1200 парогенератора. Опыт эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 показывает, что зона сварного соединения № 111 склонна к образованию и развитию эксплуатационных дефектов. По результатам периодического неразрушающего контроля зоны сварного соединения № 111, выполненного на ПГ различных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000, были неоднократно зафиксированы случаи обнаружения протяженных несплошностей плоскостного типа, в том числе сквозных. Таким образом, указанная зона является одной из наиболее критических зон реакторной установки с ВВЭР-1000. Коренной причины образования и развития эксплуатационных дефектов до сих пор не выявлено. Решение проблемы растрескивания СС № 111 парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 является одним из приоритетных направлений повышения безопасности эксплуатации энергоблока в период сверхпроектного срока службы. Указанная проблема определяется комплексным сочетанием температурных условий, механического и коррозионного воздействия, является актуальной и до настоящего времени окончательно не решена. Поэтому, очень важно обеспечить сбор достоверных данных о фактическом напряженно-деформированном состоянии зоны СС № 111 в различных эксплуатационных режимах (нагрузке парогенераторов давлением, разогрев/расхолаживание энергоблока, гидроиспытания 1-го и 2-го контуров). Статья раскрывает подходы и этапы создания и применения тензометрической установки с обеспечением метрологической пригодности в условиях топливной кампании на энергоблоке АЭС за счет использования адекватной физической модели для получения аддитивных и мультипликативных поправочных коэффициентов.

Ключевые слова: повышение безопасности, парогенератор, тензометрическая установка, тензопреобразователь, сварное соединение №111.

Для цитирования: Красников Ю.В., Поваров В.П., Степанов А.М., Фиш С.Г. Методы и средства обеспечения точности измерений изгибных деформаций стыковочного патрубка между реактором ВВЭР и парогенератором в условиях топливной кампании. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):61–72 <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-06>

For citation: Krasnikov Yu.V., Povarov V.P., Stepanov A.M., Fish S.G. Methods and means of ensuring the accuracy of bending deformation measurements of connecting pipe between the VVER reactor and the steam generator in the conditions of a fuel campaign. *Global nuclear security*. 2024;14(2):61–72 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-06>

Methods and means of ensuring the accuracy of bending deformation measurements of connecting pipe between the VVER reactor and the steam generator in the conditions of a fuel campaign

Yuri V. Krasnikov¹ , Vladimir P. Povarov² , Alexander M. Stepanov¹ ,
Stanislav G. Fish³  

¹ VASO ENGINEERING BUREAU LLC, Voronezh, Russian Federation

² Branch of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant (Novovoronezh NPP),
Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation

³ LLC «RESOURCE», Voronezh, Russian Federation

 stasfish@mail.ru

Annotation. The welded joint zone (WJ) No. 111 is a welding unit for the "hot" collector of the primary coolant to the DN1200 steam generator nozzle. The experience of operation of steam generators PGV-1000M of NPP power units with VVER-1000 shows that the WJ zone No. 111 is prone to the formation and development of operational defects. According to the results of periodic non-destructive testing of the WJ No. 111 zone performed at the PG of various power units of the VVER-1000 NPP, cases of detection of extended planar-type discontinuities, including through ones, were repeatedly recorded. Thus, this zone is one of the most critical zones of the reactor plant (RU) with VVER -1000. The root cause of the formation and development of operational defects has not yet been identified. Solving the problem of cracking of WJ No. 111 steam generators of nuclear power plants with VVER-1000 is one of the priority areas for improving the safety of operation of the power unit during the over-design service life. This problem is determined by a complex combination of temperature conditions, mechanical and corrosive effects, is relevant and has not yet been definitively solved. Therefore, it is very important to ensure the collection of reliable data on the actual stress-strain state of the WJ No. 111 zone in various operating modes (pressure loading of steam generators, heating/cooling of the power unit, hydraulic testing of the 1st and 2nd circuits). The article reveals the approaches and stages of creating and applying a strain gauge installation to ensure metrological suitability in the conditions of a campaign fuel company at an NPP power unit by using an adequate physical model to obtain additive and multiplicative correction coefficients.

Keywords: safety improvement, steam generator, strain gauge installation, strain converter, welded joint No.111.

Введение

В статье показаны подходы к измерению изгибных напряжений в условиях изменений температур в различных точках горячей нитки главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) на участке от реактора до первого парогенератора (ПГ) в режиме разогрева при пуске энергоблока и в режиме останова энергоблока в момент отключения первого главного циркуляционного насоса (ГЦН). Проведена оценка влияния распределения температурных полей в различных режимах на напряженно-деформированное состояние сварного соединения коллектора теплоносителя с патрубком DN1200 ПГ-1 энергоблока 5 Нововоронежской АЭС.

В статье раскрыт комплексный подход к проектированию измерительной тензометрической установки, работающей автономно в режиме реального времени, на протяжении длительного времени (1-1,5 года) на объекте со сложными условиями. Такая специфика влечет апробацию специальных комплексных подходов, которые представляют определенную научно-техническую новизну.

Данная статья представляет результаты работы, которая является продолжением исследований, изложенных в работах «Разработка и опытное внедрение системы мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла сварного соединения приварки горячего коллектора к корпусу парогенератора

5-го энергоблока Нововоронежской АЭС»¹, «Организация непрерывного многопараметрического мониторинга эксплуатационной повреждаемости СС №111 на примере энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС»², «Статистический анализ данных о повреждениях узла приварки коллектора к патрубку парогенератора АЭС с ВВЭР» [1], «Повышение эксплуатационной надежности сварных соединений парогенераторов для реакторных установок на основе ВВЭР [2]. Отличием настоящих исследований является направленность на повышение точности измерений с метрологическим обеспечением, для возможности их дальнейшего использования для количественного сравнения с цифровыми моделями.

Особенности объекта и условий функционирования оборудования

Внешний вид ГЦТ, сварного соединения (СС) №111 и объекта контроля представлен на рисунке 1.

Особенностью объекта контроля, в части проведения тензометрии сварных швов, является сочетание следующих факторов:

– высоких температур поверхности стыковочного патрубка (+300 °С);

- высоких температур воздуха в помещении в течение всей топливной кампании (+70 °С);
- большого диаметра контролируемого объекта;
- повышенного давления воздуха в атмосфере помещения;
- жестких условий по мощности дозы γ -излучения;
- длительного срока непрерывной работы;
- наличие внутреннего плакирующего слоя;
- наличие градиентов по температуре в процессе запуска и остановки блока;
- высоких уровней промышленных помех из-за близости главных циркуляционных насосов;
- больших перемещений крайних точек заделки объекта контроля;
- необходимость работы без доступа обслуживающего персонала к оборудованию нижнего уровня в течении «топливной кампании».

Это определяет ряд жестких требований к оборудованию и монтажным работам, что потребовало разработки особой технологии на выполнение следующих работ:

- монтаж датчиков и преобразователей с учетом высоких дозовых нагрузок в зоне патрубка и наличия термозащиты на его поверхности;
- монтаж вторичных преобразователей при наличии высокой температуры окружающего воздуха и высокого уровня γ -излучения;
- монтаж датчиков и термопар в стесненных условиях;
- монтаж соединительных проводов и кабелей с учетом отсутствия свободных лотков и проходок.

Эти же факторы потребовали особенного подхода при проектировании оборудования:

- выбор конструкции и комплектующих вторичных нормирующих преобразователей, схем их подключения;
- необходимость в пассивной и активной термокомпенсации измерений;
- наличие тестового и параметрического контроля, надежного метрологического обеспечения;

¹ Бакиров М.Б., Левчук В.И., Еремин А.А., Николаев Д.А., Поваров В.П., Громов А.Ф. Уразов О.В. Разработка и опытное внедрение системы мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла сварного соединения приварки горячего коллектора к корпусу парогенератора 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС // Сборник трудов 136-й Международной научно-технической конференции «Полувековое обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР в России и за рубежом», Нововоронеж, 2014. – Нововоронеж: ООО «Комфорт-Сервис», 2014. – С. 483–499.

² М.Б. Бакиров, А.А. Еремин, В.И. Левчук, В.П. Поваров. Опыт работ по использованию системы непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла в наиболее критических зонах ответственного оборудования АЭС на примере СС №111 энергоблока №5 Нововоронежской АЭС // Сборник трудов 9-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 2015. – С. 240–248

– формирования структурной и аппаратной избыточности, дублирования измерительных каналов;

– обеспечения физической защиты датчиков, термопар, кабелей и соединительных колодок в условиях этапа ремонта энергоблока.

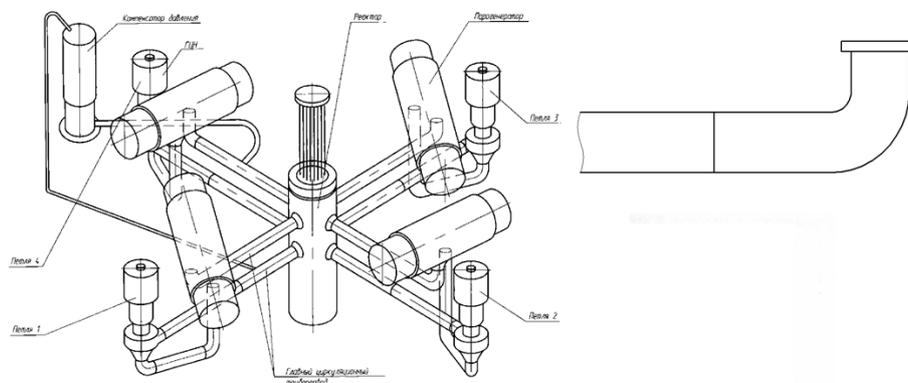


Рисунок 1. Вид ГЦТ, СС №111 и объекта контроля³
Figure 1. Type of MCP, WJ No.111 and the object of control³

На горячей нитке ГЦТ смонтированы тензопреобразователи и термопары в двух сечениях, а также тензометрические розетки с абсолютным дублированием всех измерительных каналов (рис. 2)

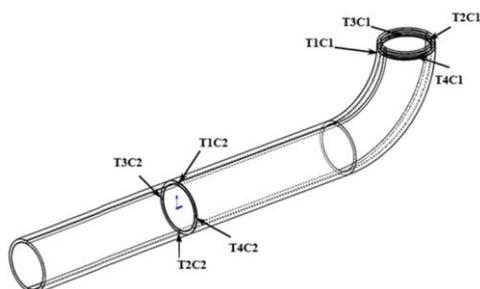


Рисунок 2. Схема размещения оборудования на контрольном трубопроводе и тензометрических розеток на ГЦТ [составлено авторами]

Figure 2. Diagram of equipment placement on the control pipeline and strain gauge sockets on the MCP [compiled by the authors]

Выбор тензорезистора АWH-8-7F-2(11)-11.0 в качестве первичного измерительного преобразователя обоснован его термостойкостью, возможностью монтажа посредством приварки и наличием в реестре средств измерения Российской Федерации №76555-19.

Осуществление монтажа тензорезисторов посредством приклеивания не представляется возможным из-за высоких температур поверхности трубопровода. Также данный тензорезистор имеет модуль пассивной температурной компенсации НТG-A1.

Структура измерительной установки

Структурная схема измерительной установки представлена на рисунке 3. В каждом сечении трубопровода монтируются две группы тензометрических розеток (ТР) ТР1 ÷ ТР6 с термопарами (ТП) ТП1 ÷ ТП6.

Для обеспечения их функционирования используется две тензометрические станции (ТС) – СТ1 и СТ2 с возможностью подключения 16 тензометрических розеток и 16 термопар каждая. Каждая из станций получает питание 12 В постоянного тока от отдельной секции рабочей станции РС и обеспечивает на передачу информации на данную рабочую станцию по последовательному интерфейсу [3].

³ Водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР-1000). – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%92%D0%AD%D0%A0-1000> (дата обращения: 18.05.2024)

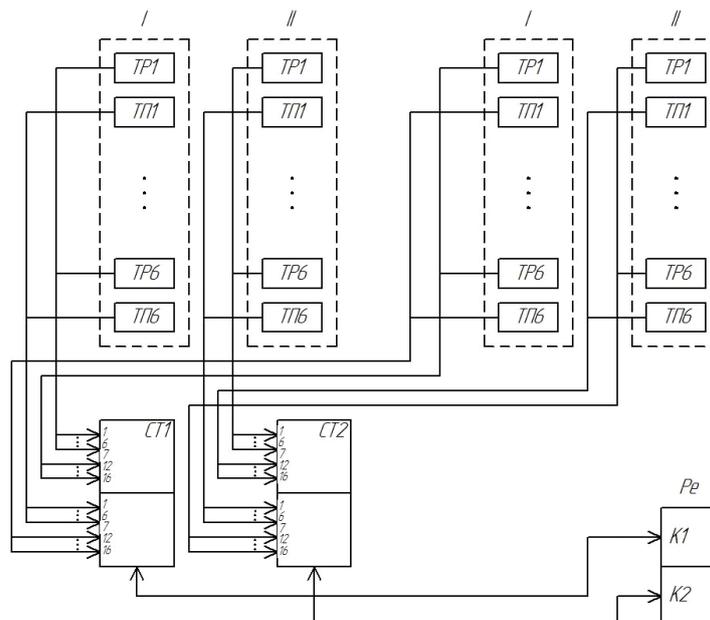


Рисунок 3. Структурная схема измерительной установки [составлено авторами]
Figure 3. Block diagram of the measuring unit [compiled by the authors]

Рабочая станция имеет две независимых секции с отдельным питанием от сети 220В 50 Гц, каждая из которых содержит отдельный сервер для обработки и накопления информации. Благодаря независимости тензодатчиков и серверов реализована стопроцентная избыточность для замещения выпавших каналов.

Станции тензодатчиков выполнены на базе нормирующего преобразователя на основе AD7730, на каждый вход/выход тензодатчик розетки [0,0]

Схема расположения измерительных точек и размещения тензопреобразователей, термопреобразователей при двухканальном контроле (схема полного дублирования) представлена на рисунке 4.

На рисунках 5-8 представлен внешний вид подготовленного к монтажу трубопровода и установленного шаблона, станции СТТС-16/16Т, смонтированных соединительных коробок и элементов монтажа.

После выполнения разметки на трубопроводе размещается шаблон и затягивается талреп до выбора зазоров между трубопроводом и шаблоном (рис. 5). Монтаж тензорезисторов и термопар, а также их защитных элементов выполняются по данному шабло-

ну. Шаблон остается на трубопроводе на весь период измерения.

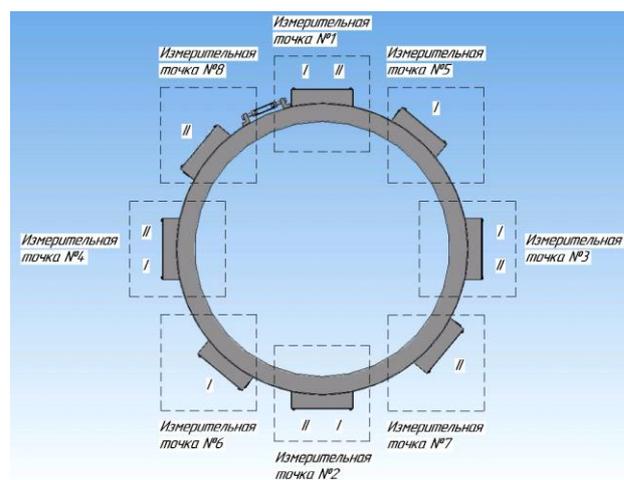


Рисунок 4. Схема расположения измерительных точек на сечении: I – тензопреобразователи, термопреобразователи первого канала «Красный»; II – тензопреобразователи, термопреобразователи второго канала «Синий» [составлено авторами]

Figure 4. The layout of the measuring points on the cross section: I – strain gauges, thermal converters of the first channel «Red»; II – strain gauges, thermal converters of the second channel «Blue» [compiled by the authors]

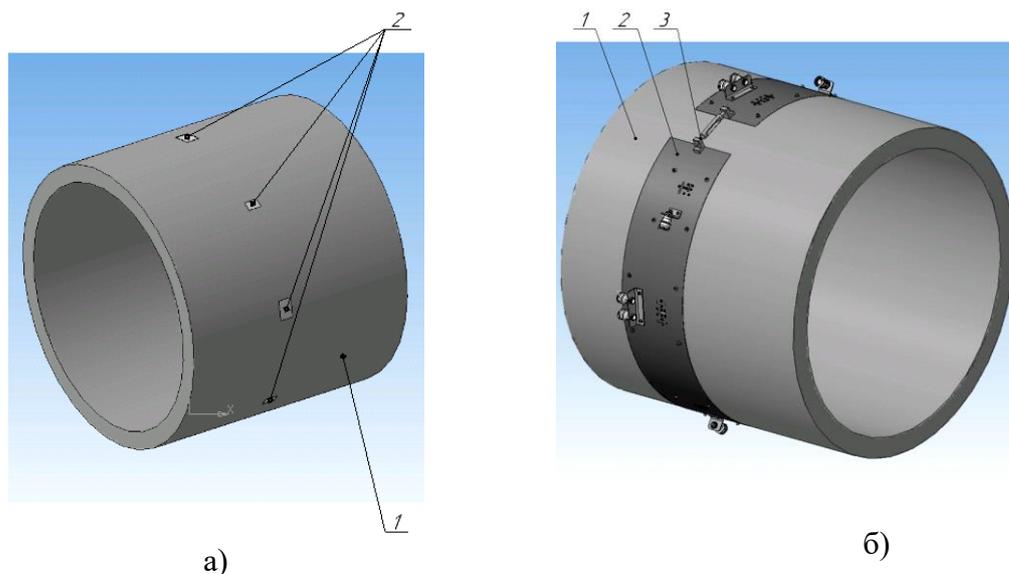


Рисунок 5. Внешний вид подготовленного к монтажу трубопровода (а) и установленного шаблона (б): 1 – трубопровод; 2 – места обработки трубопровода; 3 – шаблон; 4 – талреп
[составлено авторами]

Figure 5. The design of pipeline prepared for installation (a) and the installed template (b): 1 – pipeline; 2 – pipeline processing points; 3 – template; 4 – lanyard [compiled by the authors]

Станция тензо-термометрическая специальная СТТС-16/16Т системы измерительной выполнена в металлическом корпусе (рис. 6). На передней панели расположены винты резисторов грубой и точной настройки, закрытые колпачками. На нижней панели

расположены 32 разъема «ВХОДЫ КАНАЛОВ» для подключения датчиков измерительных каналов, 2 разъема для подключения к управляющей вычислительной машины (ВМ). На боковых панелях расположены элементы светодиодной индикации.

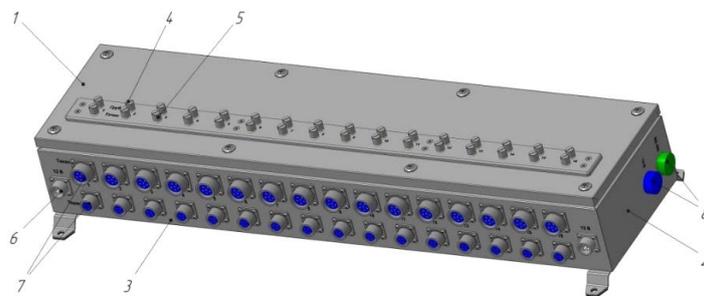


Рисунок 6. Внешний вид станции СТТС-16/16Т: 1 – панель передняя; 2 – панель боковая; 3 – панель нижняя; 4 – винты регулировки резисторов грубой настройки;

5 – винты регулировки резисторов точной настройки; 6 – разъем для подключения к управляющей ПЭВМ; 7 – разъемы «ВХОДЫ КАНАЛОВ» для подключения датчиков измерительных каналов; 8 – элементы светодиодной индикации [составлено авторами]

Figure 6. STTS-16/16T station design: 1 – front panel; 2 – side panel; 3 – bottom panel; 4 – adjustment screws for coarse adjustment resistors; 5 – adjustment screws for fine adjustment resistors; 6 – connector for connection to the controlling PC; 7 – «CHANNEL INPUTS» connectors for connection of measurement channel sensors; 8 – LED indication elements [compiled by the authors]

На рисунках 7, 8 представлен внешний вид смонтированных соединительных коробок и элементов монтажа.

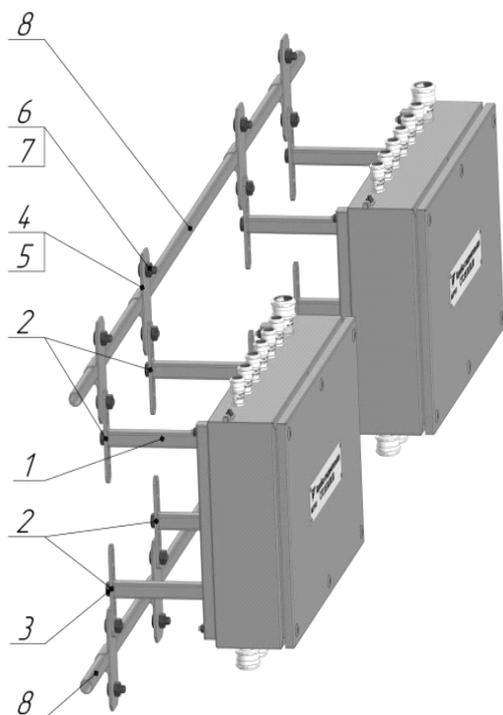


Рисунок 7. Внешний вид смонтированных соединительных коробок: 1 – кронштейн; 2 – проставка; 3,6 – болт M10; 4 – зацеп; 5 – пластина; 7 – гайка M10; 8 – перила [составлено авторами]

Figure 7. Mounted connection boxes design: 1 – bracket; 2 – spacer; 3,6 – M10 bolt; 4 – hitch; 5 – plate; 7 – M10 nut; 8 – handrail [compiled by the authors]

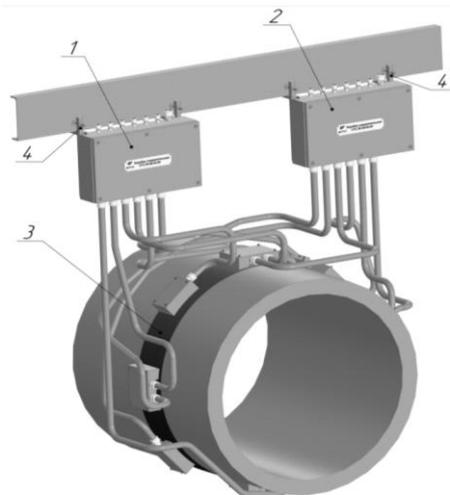


Рисунок 8. Внешний вид смонтированного оборудования в помещении трубопровода: 1 – коробка соединительная первого канала; 2 – коробка соединительная второго канала; 3 – сборка тензометрическая на контролируемом трубопроводе; 4 – кронштейны для фиксации коробок соединительных [составлено авторами]

Figure 8. Mounted equipment in the pipeline room: 1 – connection box of the first channel; 2 – connection box of the second channel; 3 – strain gauge assembly on the controlled pipeline; 4 – brackets for fixing connection boxes [compiled by the authors]

Методы и средства компенсации влияющих факторов, реализованные в установке

В оборудовании реализованы подходы к компенсации источников погрешности, перечисленные в таблице 1.

Таблица 1. Подходы к компенсации источников погрешности [составлено авторами]
Table 1. Approaches to compensation of error sources [compiled by the authors]

Источники погрешности	Способ компенсации
1. Контактные сопротивления и их изменения от температуры	Применение шестипроводной схемы питания измерительного моста
2. ТермоЭДС в местах электрических соединений.	Применение питания измерительного моста переменным током типа «меандр» с синхронным цифровым детектированием
3. Синфазная составляющая помехи	Применение «свободного» инструментального дифференциального входа
	Применение синхронного детектирования при питании измерительного моста напряжением «меандр» с частотой, кратной частоте питания ГЦН
4. Влияние неинформативных деформаций (например, от изменения избыточного давления теплоносителя в трубопроводе) и температурных деформаций.	Использование физической модели трубопровода с нагружением в термошкафу

Описание лабораторного стенда

Для выполнения имитационной градуировки и реализации активной термокомпенсации использовалось физическое моделирование объекта и условий функционирования.

Лабораторные испытания подразделялись на «холодные» и «горячие», в их основе лежит использование функциональной модели объекта контроля.

Физическая модель объекта, изготавливаемого из заготовки аналогичной трубы с плакировочным слоем, показана на рисунке 9. Химический состав модели после механической обработки соответствует материалам ГЦТ.

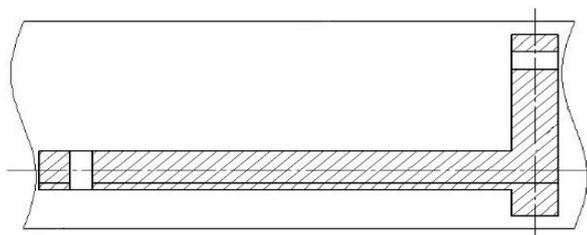


Рисунок 9. Схема изготовления модели
[составлено авторами]

Figure 9. Model manufacturing scheme [compiled by the authors]

При разработке физической модели исходили из следующих соображений:

- в качестве объекта взяты контрольные сечения С1 и С2 (см. рис. 2);
- в контрольном сечении объект испытывает изгибные деформации, а кручение не рассматривается;
- деформации за счет изменения давления внутри трубы не учитывались, так как были предусмотрены тензорезисторы для измерения деформации трубы за счет давления;
- при построении модели ставилась задача выбора ее геометрических характеристик, сечения и длины для обеспечения в координатах размещения контрольных тензорезисторов расчетных прогнозируемых механических напряжений;
- для обеспечения максимально адекватной физической модели соотношение основного металла и плакировочного слоя соответствовали конструкции штатного патрубка;

– в качестве входных параметров модели выбраны изменяемая нагрузка в приложении к консольной части жестко заделанной балки, показанной на рисунке 10, в диапазоне от 0 до 100% расчетной нагрузки и температура физической модели в диапазоне от 25 до 450 °С.

Главный принцип изготовления модели – сохранение пропорций в соотношении в сечении балки основного металла и плакировочного слоя.

Схема размещения тензометрических розеток и нагружения модели представлена на рисунке 10.

Предварительные размеры модели получены расчетным путем⁴ [6], чтобы предполагаемые деформации в модели стенда имели такой же диапазон значений, что и в контрольных сечениях ГЦТ.

Тензометрические розетки подключаются ко входам станции тензометрической. При нагружении гирями с нормальными условиями, была проведена оценка начальный коэффициент преобразования (НКП) и рабочий коэффициент преобразования (РКП) данной модели, случайной погрешности измерений, выполнена балансировка тензопреобразователей и оценка изгибных деформаций.

Для создания испытательного «горячего» стенда данная конструкция помещается в тигельную (муфельную) печь, показанную на рисунке 11, по обозначенной схеме.

При запуске печи на разогрев в диапазоне 20 °С – 300 °С при помощи контроллера печи выставляют токи стабилизации 100 °С, 150 °С, 200 °С, 250 °С, 300 °С.

При установившихся температурах определяются:

- НКП (значение на выходе без нагружения);
- значения выходного сигнала при приложении 20%, 40%, 60%, 80% и 100% расчетной нагрузки для модели в диапазоне тензочувствительности тензорезисторов;

⁴ ПНАЭ Г 7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Режим доступа: <https://www.gostrf.com/normadata/1/4293842/4293842075.pdf> (дата обращения: 18.05.2024).

- вычисляются коэффициенты влияния температуры на НКП и РКП (чувствительность измерительной схемы).

Для датчиков сжатия № 1 и 2 при повышении температуры растут показания смещения нуля. Зависимость составляет $6,6 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$. Для датчиков растяжения № 3 и 4 при повышении температуры показания нуля уменьшаются. Зависимость составляет

$5,5 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$. Ранее было выявлено, что наибольшее значение выходного напряжения, зарегистрированное за время выхода РУ на рабочие параметры, составляет 2000 мкВ , что соответствует деформации $\epsilon = 0,055\%$.

На рисунке 12 представлена зависимость выходного напряжения тензодатчиков от температуры.

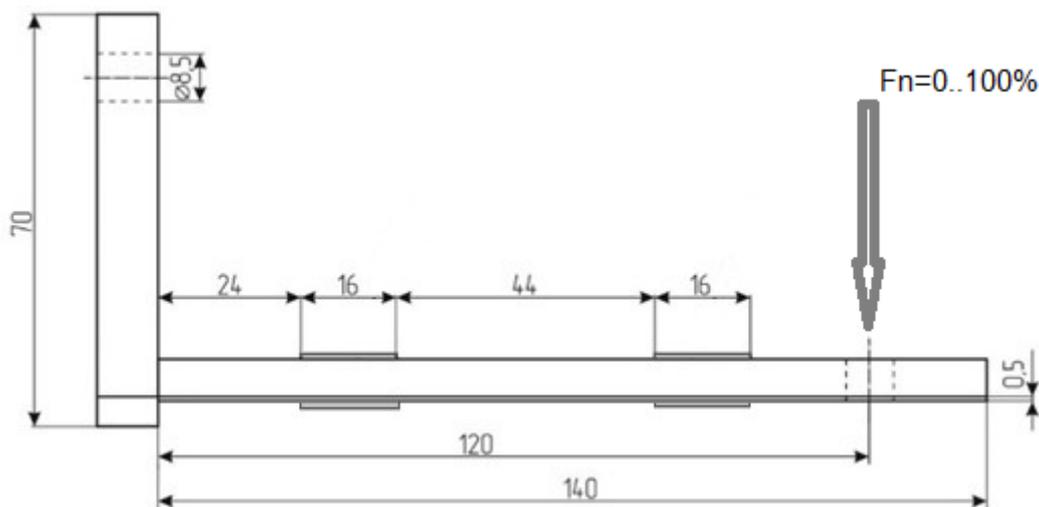


Рисунок 10. Расположение тензометрических розеток для моделирования деформаций в сечениях трубопровода [составлено авторами]

Figure 10. Location of strain gauge sockets for modeling deformations in pipeline sections [compiled by the authors]

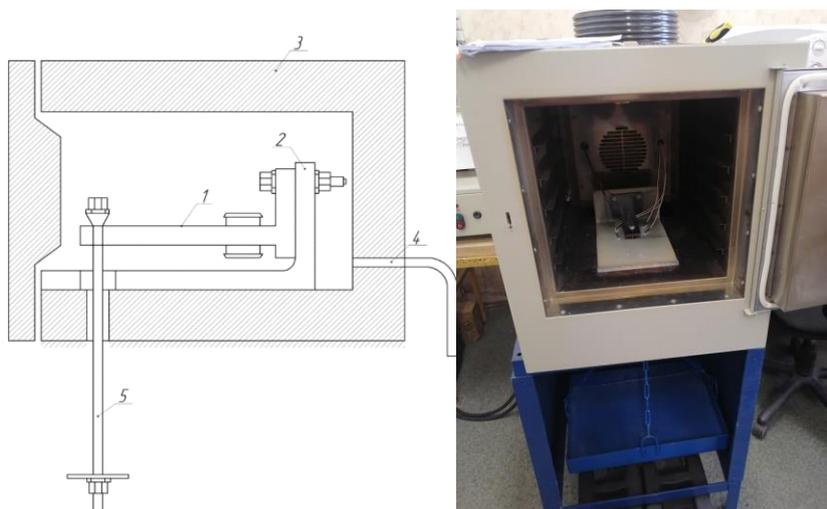


Рисунок 11. Схема размещения оборудования стенда в печи и внешний вид стенда: 1 – модель; 2 – основание; 3 – печь; 4 – кабельный ввод; 5 – нагрузочное устройство [составлено авторами]

Figure 11. The layout of the stand equipment in the furnace and the stand design: 1 – model; 2 – base; 3 – furnace; 4 – cable gland; 5 – load device [compiled by the authors]

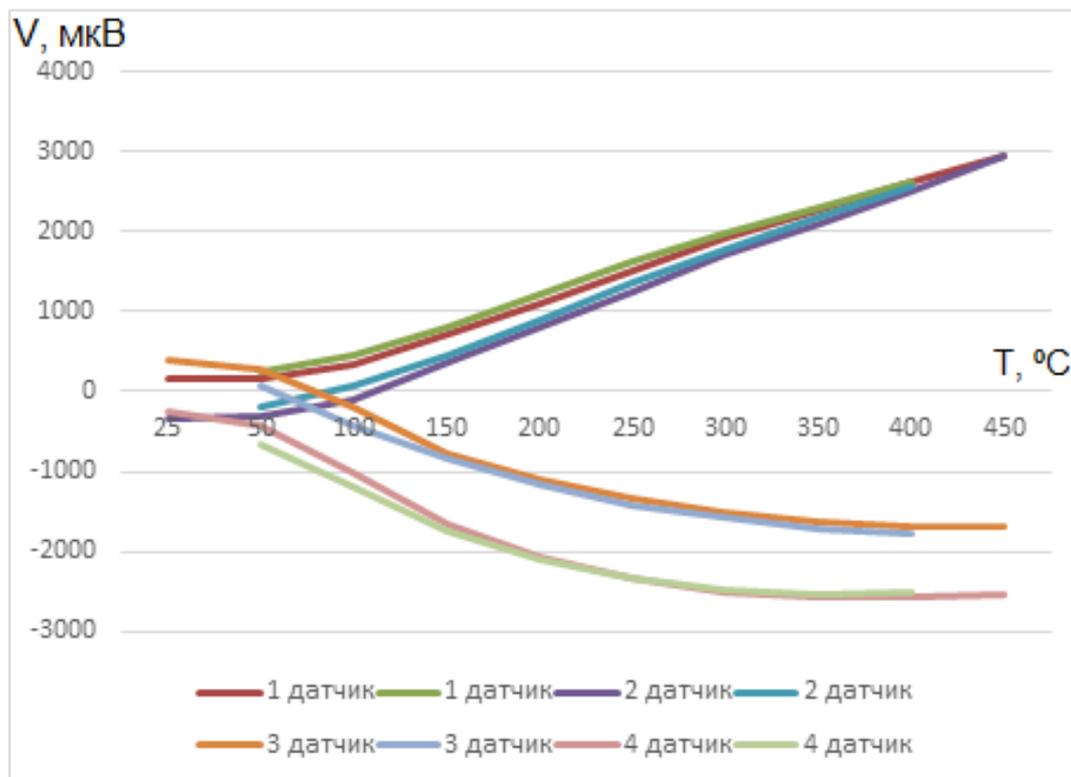


Рисунок 12. Выходное напряжение тензопреобразователей в зависимости от температуры [составлено авторами]

Figure 12. Output voltage of strain gauges depending on temperature [compiled by the authors]

Локальный перепад температуры не превышает 2 °С, что находится на уровне погрешности измерения. Локальный перепад температуры практически не оказывает влияния на изгибные напряжения. Изменения температуры в целом трубопровода оказывают основной вклад в изменения деформаций.

Выводы

1. Данная измерительная задача реализуется с учетом всех возможных негативных факторов, влияющих на погрешность измерений:

- широкий диапазон температур;
- высокий уровень электромагнитной помехи;
- высокий фон гамма-излучения, исключаящий размещение аппаратуры вблизи объекта.

2. Реализована активная термокомпенсация с использованием коэффициентов, по-

лученных при исследованиях модели объекта.

3. Благодаря независимости тензометрических станций и серверов реализована стопроцентная избыточность для замещения выпавших каналов.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что принятый комплексный подход к проектированию показал свою состоятельность, а накопленный опыт продемонстрировал, что измерение напряжений элементов реакторной установки возможно проводить с высокой точностью и надежностью.

Это может быть востребовано не только для поиска отклонений, причин дефектов, но и в качестве мониторинга в режиме реального времени, наряду с такими параметрами как давление, температура, химический состав теплоносителя, реактивность и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., Саакян С.П., Чепурко В.А. Статистический анализ данных о повреждениях узла приварки коллектора к патрубку парогенератора АЭС с ВВЭР. *Вестник кибернетики*. 2017;(2/26):24–31. Режим доступа: <https://www.vestcyber.ru/jour/article/view/59> (дата обращения: 15.05.2024).
Povarov V.P., Sahakian S.P., Chepurko V.A. Statistical analysis of data on damage to the collector welding unit to the nozzle of a steam generator of a nuclear power plant with VVER. *Bulletin of Cybernetics*. 2017;(2/26):24–31. Available at: <https://www.vestcyber.ru/jour/article/view/59> (accessed: 15.05.2024).
2. Подрезов Н.Н., Томилин С.А., Шишов В.В. Повышение эксплуатационной надежности сварных соединений парогенераторов для реакторных установок на основе ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;(4):22–26. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2016.4-3.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).
Podrezov N.N., Tomilin S.A., Shishov V.V. Operational reliability increase of welded connections of steam generators for PWR reactor installations. *Global nuclear safety*. 2016;(4):22–26. Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2016.4-3.pdf> (accessed: 10.05.2024).
3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. 304 с. Режим доступа: <https://www.znvo.kz/books/42-pnpnpn/546-gutnikov.html> (дата обращения: 13.05.2024).
Gutnikov, V.S. Integrated electronics in measuring devices. Leningrad: Energoatomizdat, 1988. 304 p. Available at: <https://www.znvo.kz/books/42-pnpnpn/546-gutnikov.html> (accessed: 13.05.2024).
4. Макаров Р.А., Ренский А.Б., Боркунский Г.Х., Этингоф М.И. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1975. 287 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006975341?ysclid=lwklxavno0242839252> (дата обращения: 15.05.2024).
Makarov R.A., Rensky A.B., Borkunsky G.H., Etingof M.I. Tensometry in mechanical engineering. A reference guide. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 287 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006975341?ysclid=lwklxavno0242839252> (accessed: 15.05.2024).
5. Литвак В.И. Тензореле. Расчет. Конструирование. Применение. Москва: Машиностроение, 1989. 158 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001464483?ysclid=lwkm0ddgb4930102262> (дата обращения: 17.05.2024).
Litvak V.I. Tensorele. Calculation. Design. Application. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 160 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001464483?ysclid=lwkm0ddgb4930102262> (accessed: 17.05.2024).
6. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. Москва: Наука, 1990. 238 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001527740> (дата обращения: 18.05.2024).
Parton V.Z. Mechanics of destruction: from theory to practice. Moscow: Nauka, 1990. 238 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001527740> (accessed: 18.05.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Красников Ю.В. – выбор методов решения, конструирование тензометрической станции, метрологическое обеспечение;
Поваров В.П. – постановка задачи, анализ результатов;
Степанов А.М. – конструирование тензометрической станции, анализ натурных результатов, подготовка текста статьи;
Фиш С.Г. – проведение численных расчетов, подготовка текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Исследование выполнено без дополнительных источников финансирования.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Krasnikov Yu.V. – selection of solution methods, design of a strain gauge station, metrological support;
Povarov V.P. – statement of the problem, analysis of results;
Stepanov A.M. – design of a strain gauge station, analysis of full-scale results, preparation of the article text;
Fish S.G. – carrying out numerical calculations, preparing the text of the article.

FUNDING:

No additional finding is involved in the research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Юрий Владимирович Красников, кандидат технических наук, директор, главный конструктор ООО «ИНЖЕНЕРНОЕ БЮРО ВАСО», г. Воронеж, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0396-1788>
e-mail: secretar@metrol.ru

Владимир Петрович Поваров, доктор технических наук, директор Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>
e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Александр Михайлович Степанов, начальник НИР ООО «ИНЖЕНЕРНОЕ БЮРО ВАСО», г. Воронеж, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7967-2419>
e-mail: root@metrol.ru

Станислав Геннадьевич Фиш, кандидат технических наук, заместитель директора по развитию ООО «РЕСУРС», г. Воронеж, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5970-4023>
e-mail: stasfish@mail.ru

Поступила в редакцию 26.03.2024
После доработки 28.05.2024
Принята к публикации 06.06.2024

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare that there is no conflict of interest

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Yuri V. Krasnikov, Can. Sci. (Engin.), Head, Chief Designer, LLC «Engineering Bureau of VASO», Voronezh, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0396-1788>
e-mail: secretar@metrol.ru

Vladimir P. Povarov, Dr. Sci. (Engin.), Head of Novovoronezh Nuclear Plant the Branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9092-9160>
e-mail: nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Alexander M. Stepanov, Head of the Scientific Research Department, LLC «Engineering Bureau of VASO», Voronezh, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7967-2419>
e-mail: root@metrol.ru

Stanislav G. Fish, Can. Sci. (Engin.), Deputy Director for Development, «RESOURCE» LLC, Voronezh, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5970-4023>
e-mail: stasfish@mail.ru

Received 26.03.2024
Revision 28.05.2024
Accepted 06.06.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

EDN LQRKEU

Оригинальная статья / Original paper



Многоточечная модель кинетики с мощностным эффектом реактивности для контроля аксиального офсета реактора ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой

С.С. Правосуд^{1,2}  , Я.О. Якубов² , В.А. Сусакин² 

¹АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл., Российская Федерация

²Северский Технологический Институт – филиал Национального Исследовательского Ядерного Университета МИФИ, г. Северск, Томская обл., Российская Федерация

 SSPravosud@mephi.ru

Аннотация. В данной работе предложена и смоделирована в среде MATLAB многоточечная модель кинетики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящая из различной совокупности моделей точечной кинетики в аксиальном направлении – две точки, четыре, шесть, восемь и десять, которые связаны между собой коэффициентами, определенными в рамках диффузионного приближения. Для более точного описания динамических режимов работы реактора модель была охвачена мощностной обратной связью, определенной по температурным эффектам реактивности и подхода Манна для описания теплогидравлических процессов, в рамках которого предполагается, что к одному топливному узлу примыкает два узла теплоносителя. На модели, состоящей из четырех аксиальных точек, дополнительно было исследовано влияние различного числа групп запаздывающих нейтронов на точность и скорость моделирования переходных процессов в режиме следования за нагрузкой. В работе также предложена новая математическая модель органов регулирования, которая воздействует последовательно на разные точки при введении и выведении путем комбинаций функций знака sign. Результаты численного моделирования показывают, что статистическая точность предложенных моделей является удовлетворительной, общий вид переходных процессов согласуется с физическими представлениями. Данная работа способствует дальнейшему развитию связанных в нейтронно-физическом смысле точечных моделей ядерного реактора для улучшения синтеза автоматического регулятора мощности.

Ключевые слова: точечная кинетика, многоточечная кинетика, режим следования за нагрузкой, мощностной эффект реактивности, модель Манна, аксиальный офсет, ВВЭР-1200, верификация.

Благодарность. Авторы выражают благодарность отделу тренажерного обучения АНО ДПО «Техническая академия Росатома» за помощь в проведении работ.

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

For citation: Pravosud S.S., Yakubov Ya.O., Susakin V.A. Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode of operation. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):73–90 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode of operation

Sergei S. Pravosud^{1,2}  , Yaroslav O. Yakubov² , Vladislav A. Susakin² 

¹Rosatom Technical Academy, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation

²Seversk Technological Institute – a branch of the National Research Nuclear University MEPhI, Seversk, Tomsk region, National Research University «MEPhI», Russian Federation

 SSPravosud@mephi.ru

Abstract. This article proposes the multipoint kinetics model consisting with different number of point kinetics model (two points, four points, six points, eight points, ten points) in the axial direction for the VVER-1200 nuclear reactor. Each node is coupled with others through the coupling coefficients determined from the diffusion approach. For more precise description of the dynamical modes of the reactor operation, the proposed model integrates the power reactivity feedback derived from temperature reactivity coefficients and Mann's thermal hydraulic model which assumes one fuel node adjacent to two coolant nodes. On the model with four axial points, additionally was tested the influence of the different number of delayed neutrons groups on the accuracy results and model running time during the load-following mode of operation. Moreover, the novel model of the control rods is introduced, utilizing a combination of sign functions to sequentially influence all nodes during insertion or withdrawal. The computational results show that the accuracy of the proposed model is satisfactory, and general assumptions about transients align with their physical definitions. This research contributes to the advancement of the point-like nuclear reactor modeling for improvement of the automatic power controller synthesis.

Keywords: point kinetics, multipoint kinetics, load-following mode, Mann's model, power reactivity coefficient, axial offset, VVER-1200, verification.

Acknowledgment. Authors express their gratitude to the Simulator Training Department of the Rosatom Technical Academy for their help.

Введение

Для изучения динамических режимов работы ядерного реактора, синтеза систем автоматического регулирования мощности, широко используются модели со сосредоточенными параметрами, основанные на модели точечной кинетики (Point Kinetics Approximation, PKA) [1], дополненной местными обратными связями по технологическим параметрам. Однако, такие модели не могут описывать пространственные эффекты, связанные, например, с накоплением продуктов деления, приводящих к шлакованию и отравлению. В то же время, нарушение баланса в верхней и нижней частях активной зоны реакторов типа PWR или ВВЭР в режиме следования за нагрузкой может привести к возникновению аксиальных ксеноновых колебаний. В работе «Исследование алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1200» [2] коллективом авторов были исследованы различные варианты подавления ксеноновых колебаний, в том числе и только с работой АРМ – автоматического регулятора мощности реакторной установки; результат численного экспери-

мента показал, что подавления колебаний с помощью исключительно АРМ без привлечения дополнительных управляющих воздействий не позволяет удерживать значение аксиального офсета в границах офсетно-мощностной диаграммы. Это может быть объяснено тем, что синтез АРМ происходит на модели точечной кинетики. Следовательно, контроль аксиального офсета – технологической характеристики равномерности энерговыделения в активной зоне, а также разработка и верификация математических моделей, которые могут отображать его изменение, и при этом подходящие для синтеза автоматического регулятора мощности, является актуальной задачей.

Многоточечная модель кинетики (Multipoint kinetics, МПК или теория связанных реакторов) была впервые предложена Эйвери [3] в 1958 г. Основываясь на физическом предположении о диффузии нейтронов, подход Эйвери предлагает разбиение всего объема реактора на зоны – узлы малых объемов, внутри которых нейтронное поле будет достаточно равномерным, что позволяет описывать поведение нейтронов моделью то-

чечной кинетики. При этом каждый узел связан с другими узлами коэффициентами, учитывающими взаимную диффузию в данные узлы и из них. В оригинальной работе Эйвери рассмотрел случай разбиения на две зоны управления, в то время как в работе Беллени-Моранте [4], используя подход Эйвери, рассмотрел общий случай разбиения на G узлов для реактора UTR-10.

Кобаяши [5] использовал более строгий математический подход для составления многоточечной модели, базируясь на зависимых от времени многогрупповых диффузионных уравнениях для разных областей активной зоны, а также представил аналитические выражения и их изменения для коэффициентов связи, времени жизни нейтронов и других параметров из-за отклонений других параметров многоточечной модели кинетики в простых геометриях. Детальное сравнение двух подходов МРК с РКА было проведено Валоччи и др. [6]. Они включили рассмотрение своих подходов в код APPOLO3, и исследовали переходные процессы в ядерном реакторе на тепловых нейтронах.

Используя многоточечный подход, Донг и др. [7] разработали математическую модель модульного реактора ВТГР; полученные результаты численного моделирования показывают, что статистически точность предложенной модели является удовлетворительной, а переходные процессы соответствуют экспериментальным. Ванг и др. [8] разработали многоточечную математическую модель реактора AP-1000. Полученные результаты моделирования показывают, что переходные процессы и пространственные ксеноновые колебания хорошо согласуются с общими физическими представлениями. Важным результатом, полученным исследователями группами Донга и Ванга [7,8], является то, что полученные модели способны отражать информацию о распределении мощности в активной зоне реактора. Также было заключено, что предложенные модели могут служить основой при проектировании системы управления мощностью реактора AP1000 и ВТГР.

Пучальски и др. [9] исследовали многоточечную модель, описывающие теплогидравлические процессы в активной зоне реактора

PWR. В другой работе ими же [10] предложен метод для поиска коэффициентов энерговыделения при вводе органов регулирования СУЗ. Авторами также обосновано, что введение коэффициентов распределения мощности в расширенную многозонную модель позволяет использовать более совершенные и сложные алгоритмы управления активной зоной реактора PWR, например, в области управления распределением температур топливных элементов и теплоносителя. Однако для описания нейтронно-физических процессов в указанных работах [9,10] используется классическая модель точечной кинетики, то есть не учитываются пространственные нейтронно-физические процессы.

Жеровником и др. сделан подробный обзор предыдущих работ в области многоточечной кинетики и управлению реактором в режимах следования за нагрузкой [11]. Анализ, в основном, сосредоточен на разработанных для таких целей моделей реакторов с водой под давлением (PWR). Подробно описаны и сопоставлены различные приближения нестационарной задачи переноса нейтронов, а также сравнены различные современные алгоритмы управления, такие как управление с прогнозирующими моделями (MPC), управление на основе нечеткой логики (FLC), оптимальное управление на основе линейно-квадратичного Гауссова регулятора (LQG) и др.

Среди работ, использующих при синтезе систем автоматического регулирования многоточечный подход следует отметить Маусказеми [12] (Control of a pressurized light-water nuclear reactor two-point kinetics model with the performance index-oriented PSO): разработанный ПИД-регулятор для управления мощностью адаптировался к различным нагрузкам с использованием оптимизации методом роя частиц (PSO). Помимо прочего, был исследован режим следования за нагрузкой и изменение аксиального офсета. Зайдабади и др. [13] (Adaptive robust control for axial offset in the P.W.R nuclear reactors based on the multipoint reactor model during load-following operation) представил адаптивное робастное управления реактором PWR в режиме следования за нагрузкой, ис-

пользуя четырехточечную модель кинетики. Афтаб и Луан, базируясь на двухточечной модели, разработали линейную переменную идентификацию на основе метода Такаги – Сугено нечеткой логики [14]. Расширяя подход, Зайдабади и др. [13], Абдурахим и др. [15] использовали адаптивное управление в скользящем режиме второго порядка, способное эффективно подавлять ксеноновые колебания в режиме следования за нагрузкой.

В данной работе в программном пакете MATLAB как S-function lv.2 для исследования режима следования за нагрузкой были предложены многоточечные модели реактора ВВЭР-1200, состоящие из 2, 4, 6, 8 и 10 узлов в аксиальном направлении, и охваченные мощностной обратной связью, определенной на основе температурных эффектов реактивности для упрощения рассматриваемого подхода, так как известно, что такая модель хорошо подходит для описания медленных квазистационарных процессов. Также исследовано влияние различного числа групп (1 группа, 3 группы, 6 групп, 8 групп) запаздывающих нейтронов на точность переходных процессов и время моделирования. Более того, предложен новый, значительно расширяющий подход ряда исследований [12-15] к математической модели ОР СУЗ с использованием комбинаций функций знака sign, которые позволяют учесть последовательное воздействие на все узлы при вводе органов регулирования.

Модель точечной кинетики

Модель точечной кинетики была представлена в работе Генри [1] для анализа нестационарных процессов. Данное уравнение базируется на односкоростном нестационарном уравнении диффузии нейтронов, не учитывает пространственное распределение нейтронного потока. Уравнение точечной кинетики записывается в виде (1):

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^k \lambda_i C_i(t) \\ \frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

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

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

Λ – время жизни нейтронов (сек), ρ – реактивность, вносимая ОР СУЗ,

β – суммарная доля запаздывающих нейтронов $\beta = \sum_i \beta_i$,

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

В общепринятой форме для большинства расчетов переходных процессов используется шесть групп ($k = 6$) запаздывающих нейтронов, которые распределены в зависимости от их времени жизни [1]. Велоччи и др. [6] проводили сравнения различных моделей МРК используя также 6 групп запаздывающих нейтронов, так же как Донг [7], Ванг [8] и Пучальски [9]. Однако, чтобы уменьшить расхождения между измеренными и расчетными значениями реактивности, основанной на обращенном решении уравнения кинетики реактора, рекомендуется новое представление, основанное на восьмигрупповом подходе ($k = 8$), предложенное Сприггсом и др. [16]. Сокращенное до трех групп ($k = 3$) приближение, предложенное Скиннером и Коэном [17], также хорошо проявило себя в анализе асимптотического поведения передаточной функции ядерного реактора, а также при останове реактора, и, например, было использовано в работах Маусаказеми [12], Зайдабади [13], Абдурахима [15] при моделировании систем автоматического регулирования мощности. Афтаб и Луан [14] ограничились одной группой запаздывающих нейтронов.

Параметры запаздывающих нейтронов при одногрупповом, трехгрупповом, шестигрупповом и восьмигрупповом приближениях представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры групп запаздывающих нейтронов
Table 1. Delayed neutrons group parameters

β_i	Значения выхода i-ой группы ядер предшественников запаздывающих нейтронов				λ_i	Значения постоянной распада i-ой группы ядер предшественников запаздывающих нейтронов, сек ⁻¹			
	1 группа	3 группы	6 групп	8 групп		1 группа	3 группы	6 групп	8 групп
β_1	.0065000	.0002145	.0002145	.0002145	λ_1	0.1000	0.0124	0.1280	0.0125
β_2	-	.0022490	.0014235	.0010010	λ_2	-	0.0369	0.0300	0.0283
β_3	-	.0040365	.0012740	.0005915	λ_3	-	0.6320	0.1240	0.0425
β_4	-	-	.0025675	.0012805	λ_4	-	-	0.3250	0.1593
β_5	-	-	.0007475	.0021515	λ_5	-	-	1.1180	0.3628
β_6	-	-	.0002730	.0005850	λ_6	-	-	2.6660	1.2648
β_7	-	-	-	.0005265	λ_7	-	-	-	1.8330
β_8	-	-	-	.0001495	λ_8	-	-	-	3.4140
$\beta = \sum \beta_i$.0065000	.0065000	.0065000	.0065000					

Многоточечная модель кинетики

В данной работе, так же как в исследованиях Донга и Ванга [7,8], односкоростная

многоточечная модель кинетики представлена в виде (2):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dn_j(t)}{dt} &= \frac{\rho_j - \beta}{\Lambda} n_j(t) + \sum_{i=1}^k \lambda_i C_{ji}(t) + \omega_{j+1 \rightarrow j} n_{j+1}(t) + \omega_{j-1 \rightarrow j} n_{j-1}(t) - \omega_{j \rightarrow j+1} n_j(t) - \omega_{j \rightarrow j-1} n_j(t) \\ \frac{dC_{ji}(t)}{dt} &= \frac{\beta_i}{\Lambda} n_j(t) - \lambda_i C_{ji}(t) \\ \omega_{j \rightarrow j+1} &= \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{n_j(0)}{n_{j+1}(0)} P_{обм} \\ \omega_{j \rightarrow j-1} &= \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{n_j(0)}{n_{j-1}(0)} P_{обм} \\ \omega_{j+1 \rightarrow j} &= \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{n_{j+1}(0)}{n_j(0)} P_{обм} \\ \omega_{j-1 \rightarrow j} &= \frac{Dv}{\Delta H d} \frac{n_{j-1}(0)}{n_j(0)} P_{обм} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

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

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

ΔH – высота узла (см);

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

$P_{обм}$ – вероятность обмена нейтронами (~0.01).

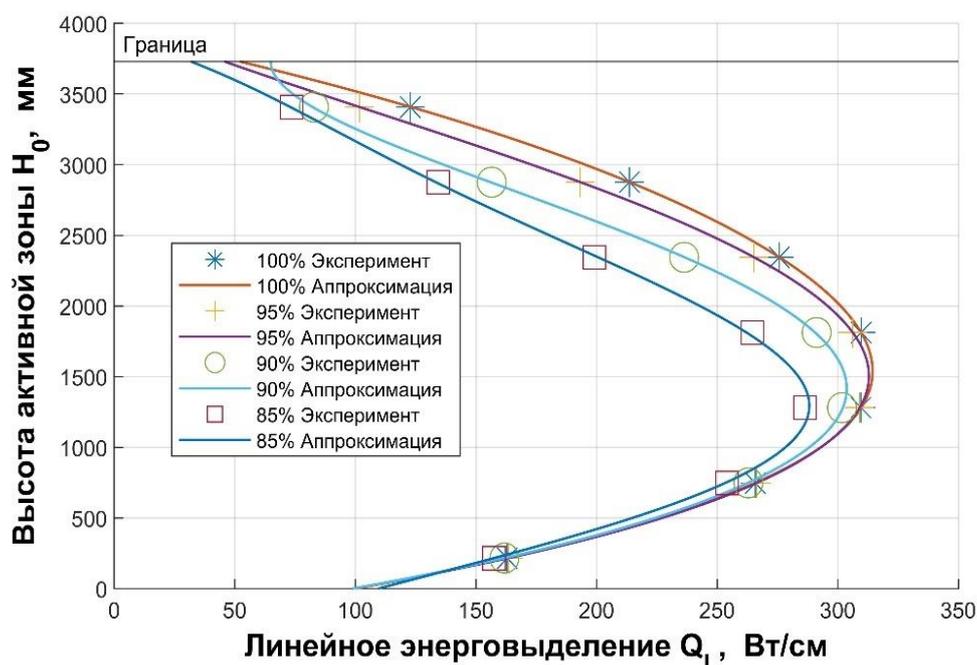
Поправка на вероятность обмена нейтронами между разными зонами введена в соответствии с диссертационным исследованием М.А. Вольман «Имитационное моделирование нейтронно-физических и теплогидрав-

лических процессов в реакторах ВВЭР-1000» [18].

Для получения коэффициентов доли энерговыделения в активной зоне реактора ВВЭР-1200, были использованы данные детекторов прямого заряда по наиболее энергонагруженной ТВС (10–29), при перемещении 12 группы ОР СУЗ и мощностях 100%, 95%, 90%, 85% от номинальной (данные получены с многофункционального тренажера ВВЭР-1200). Затем полученные значения были аппроксимированы полиномами пятого порядка методом наименьших квадратов (коэффициент детерминации $R^2 > 0.99$). Полученные данные представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2. Линейное энерговыделение на различных уровнях мощности**Table 2.** Linear power density distribution at different power levels

№ ДПЗ	Линейное энерговыделение наиболее энергонагруженной ТВС (10–29) $Q_L, \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$			
	100%	95%	90%	85%
7	122.8	101.6	82.8	73.5
6	213.6	193.2	156.5	134.4
5	275.7	265.2	236.3	199.1
4	309.7	306.2	291.2	264.6
3	309.6	309.0	301.7	286.4
2	265.8	266.4	262.8	254.1
1	162.9	163.4	161.8	157.4

**Рисунок 1.** Линейное энерговыделение по наиболее энергонагруженной ТВС (10–29) при варьировании мощности реактора в пределах 100%–85%**Figure 1.** Linear power density distributions for the most energy-loaded fuel assembly (10–29) when varying the reactor power over the range of 100%–85%

Аксиальный офсет составляет -9.28% для 100% уровня мощности, -12.53% для 95%, -17.9% для 90% и -22.2% для уровня мощности 85%.

Ванг с соавторами. в работе [8] исследовали деление реактора AP1000 в аксиальном направлении на 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 20, 42 точек, и при этом отметили, что между делением на 20 и 42 практически отсутствует разница в точности моделирования, однако время вычислений увеличивается более чем в 2 раза. Важно отметить, что в качестве эталона была взята сама схема деления на 42 узла, а не экспериментальная модель. Более того, оптимальной схемой делений была признана 14 точечная, а отличие 14 точечной

с 4 точечной схемой было незначительным. В своей работе Донг и соавторы. [7] ограничились 10 точками для активной зоны реактора ВТГР. При этом в указанных исследованиях [7,8] проводилось моделирование только скачкообразного введения реактивности в определенные точки без использования явной модели органов регулирования, и как следствие, не был исследован режим следования за нагрузкой, поэтому предложенное в текущей работе исследование сохраняет свою актуальность.

При синтезе системы автоматического регулирования мощности авторские команды Маусаказеми и Афтаба [12,14] ограничились всего двумя точками. Разбиение же на 4 точ-

ки в аксиальном направлении показало себя удовлетворительно в исследованиях Зайдабади и Абдурахим [13,15], однако, как отмечалось выше, в проанализированных работах [12-15] были использованы независимые друг от друга в верхней и нижней частях активной зоны математические модели ОР СУЗ, что накладывает ограничение на дальнейшее применение результатов. Более того, в некоторых из работ отсутствовала разница в мощности между верхом и низом активной зоны, то есть аксиальный офсет на начало моделирования был равен 0%.

Так как основная цель авторов работы – использование в дальнейшем разработанной

модели для синтеза системы автоматического регулирования мощности, то авторы ставят задачу нахождения наиболее удовлетворительной модели с точки зрения статистической точности результатов вычислений и скорости этих вычислений.

На основе аппроксимирующего полинома для уровня мощности 100% были найдены значения линейного энерговыделения, соответствующие серединам высот узлов, внутри которых используется модель точечной кинетики (2 точки, 4 точки, 6 точек, 8 точек и 10 точек в аксиальном направлении). Данное распределение представлено на рисунке 2.

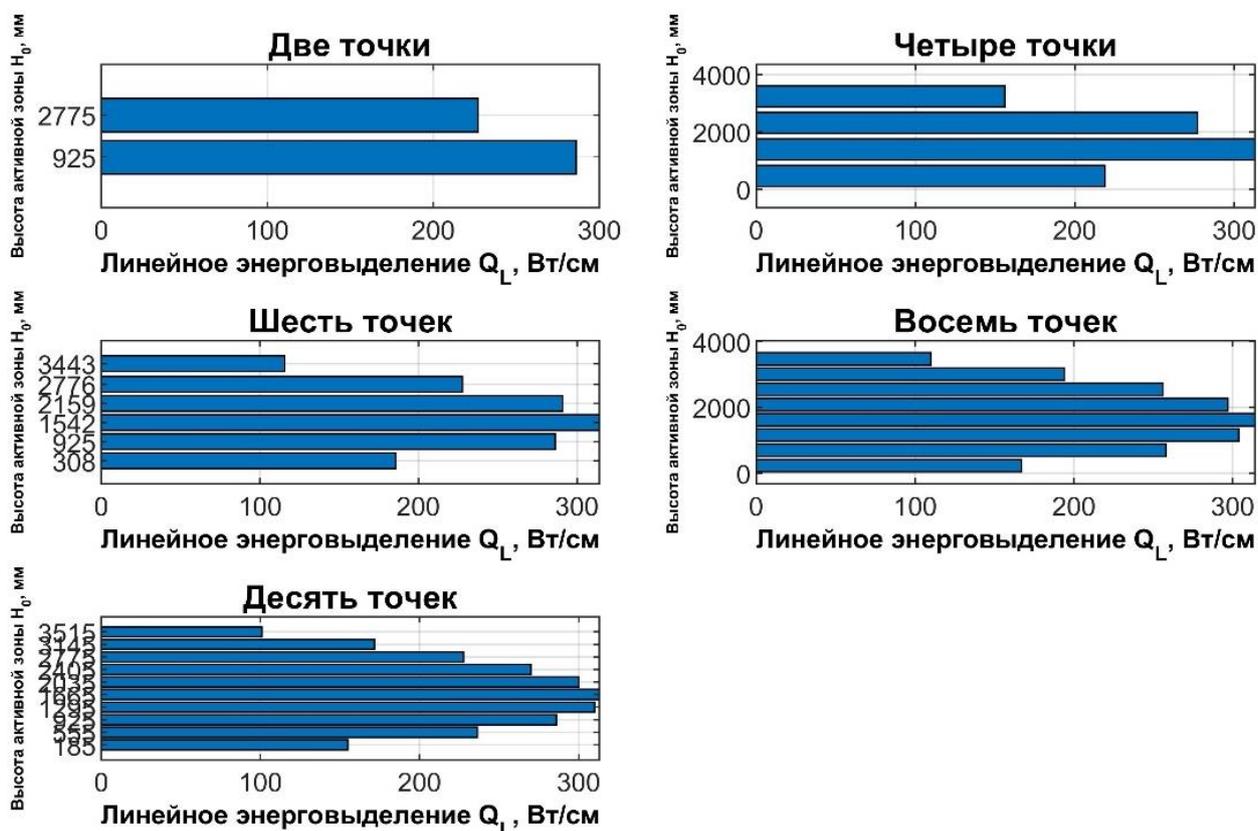


Рисунок 2. Данные по энерговыделению при использовании различного числа аксиальных точек
Figure 2. Data about the released energy when the different number of axial points is used

Например, для двухточечной модели можно установить, что в верхней части активной зоны выделяется примерно 44% от всей энергии, и примерно 56% - в нижней части.

Аксиальный офсет [11] определяется по формуле (3):

$$AO = \frac{P_{\text{верх}} - P_{\text{низ}}}{P_{\text{верх}} + P_{\text{низ}}} \quad (3)$$

Поэтому аксиальный офсет на начало моделирования (100% мощность) для всех моделей составляет: - 11.5% – для двухточечной модели, -10.26% – для четырехточечной, -10.69% – для шеститочечной, -9.79% – для

восьмиточечной, и -9.70% – для десятиточечной. Можно отметить, что при увеличении числа точек аксиальный офсет все более приближается к экспериментальному для уровня мощности 100%.

Мощностной эффект реактивности

Известно, что мощностной эффект реактивности проявляет себя опосредованно и может быть определен на основании других эффектов реактивности. Например, в работе [19] Казанский и Слекеничс определили для реактора типа ВВЭР мощностной эффект реактивности по температурным эффектам реактивности топлива и теплоносителя как представлено в выражении (4):

$$\frac{d\rho}{dP} = a_P = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \rho}{\partial T_i} \frac{dT_i}{dP} = a_T^T \frac{dT_T}{dP} + a_{TН}^T \frac{dT_{ТН}}{dP} \quad (4)$$

В представленной работе [18] температура теплоносителя принималось равной сумме входной и выходной температур теплоносителя. В текущей работе в качестве опорной модели выступает верифицированная модель динамики [20], использующая подход Р. Манна для описания теплогидравлических процессов, которая может быть представлена в виде (5):

$$\begin{cases} m_T \gamma_T \frac{d\bar{T}(t)}{dt} = \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ m_{ТН} \gamma_{ТН} \frac{d\bar{\theta}_1(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) - G_{ТН} \gamma_{ТН} (\bar{\theta}_1(t) - \theta_{\text{вх}}) \\ m_{ТН} \gamma_{ТН} \frac{d\bar{\theta}_2(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}(t) - \bar{\theta}_1(t)) - G_{ТН} \gamma_{ТН} (\bar{\theta}_2(t) - \bar{\theta}_1(t)) \end{cases} \quad (5)$$

где P – тепловая мощность ядерного реактора (МВт);

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

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

$S_{\text{пов}}$ – площадь поверхность теплообмена (м^2);

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

m_T – масса топливных элементов (кг);

γ_T – удельная теплоемкость топливных элементов ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$);

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

$m_{ТН}$ – масса теплоносителя в активной зоне (кг);

$\gamma_{ТН}$ – удельная теплоемкость теплоносителя ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$);

$\bar{\theta}_1(t), \bar{\theta}_2(t)$ – усреднённые поперек канала теплоносителя температуры в первом и втором узлах (низ и верх активной зоны) соответственно ($^{\circ}\text{C}$).

Все численные параметры взяты из [17]. Принимая равной 0 левую часть уравнения (установившийся режим), находим установившееся значения температур топлива \bar{T} , а также температур теплоносителя в первом и втором узлах $\bar{\theta}_1$ и $\bar{\theta}_2$ соответственно (6.1):

$$\begin{cases} \bar{T} = \frac{\varepsilon}{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}} P + \bar{\theta}_1 \\ \bar{\theta}_1 = \frac{1-\varepsilon}{2(K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + G_{ТН} \gamma_{ТН})} P + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2(K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + G_{ТН} \gamma_{ТН})} \bar{T} + \frac{G_{ТН} \gamma_{ТН}}{(K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}} + G_{ТН} \gamma_{ТН})} \theta_{\text{вх}} \\ \bar{\theta}_2 = \frac{1-\varepsilon}{2G_{ТН} \gamma_{ТН}} P + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2G_{ТН} \gamma_{ТН}} \bar{T} + \frac{G_{ТН} \gamma_{ТН} - \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{2}}{G_{ТН} \gamma_{ТН}} \bar{\theta}_1 \end{cases} \quad (6.1)$$

Затем находим производные по мощности, предполагая, что $\theta_{\text{вх}}$ остается неизменной (6.2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{T}}{dP} = \frac{\varepsilon}{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}} + \frac{d\bar{\theta}_1}{dP} \\ \frac{d\bar{\theta}_1}{dP} = \frac{1-\varepsilon}{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}+2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} + \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}+2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \frac{d\bar{T}}{dP} \\ \frac{d\bar{\theta}_2}{dP} = \frac{1-\varepsilon}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} + \frac{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \frac{d\bar{T}}{dP} + \frac{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}-K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \frac{d\bar{\theta}_1}{dP} \end{array} \right. \quad (6.2)$$

Откуда можно установить, что (6.3):

$$\alpha_P = \alpha_T^T \frac{d\bar{T}}{dP} + \frac{\alpha_{\text{ТН}}^T}{2} \left(\frac{d\bar{\theta}_1}{dP} + \frac{d\bar{\theta}_2}{dP} \right) = \alpha_T^T \left(\frac{\varepsilon}{K_{\text{тепл}}S_{\text{пов}}} + \frac{1}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \right) + \alpha_{\text{ТН}}^T \frac{1}{2G_{\text{ТН}}\gamma_{\text{ТН}}} \quad (6.3)$$

Результат (6.3) полностью совпал с полученным в [16]. При этом необходимо учесть, что α_T^T и $\alpha_{\text{ТН}}^T$ не являются константами, а зависят от мощности. Они могут быть представлены выражениями (6.4) и (6.5) соответственно [13,15]:

$$\alpha_{\text{Tj}}^T = \left(\frac{P_j}{P_{\text{общ}}} - \frac{4.24}{j} \right) \times 10^{-5} \quad (6.4)$$

$$\alpha_{\text{ТНj}}^T = \left(-\frac{4P_j}{P_{\text{общ}}} - \frac{17.3}{j} \right) \times 10^{-5} \quad (6.5)$$

В формулах (6.4) и (6.5) учтена поправка на число j использованных точечных моделей. Следовательно, финальная версия модели динамики, состоящей из нескольких связанных точек в аксиальном направлении с учетом мощностного коэффициента реактивности, может быть записана в виде (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_j(t)}{dt} = \frac{\rho_j - |\alpha_{Pj}|(P_j - P_{j0}) - \beta}{\Lambda} P_j(t) + \sum_{i=1}^k \lambda_i C_{ij}^*(t) + \omega_{j+1 \rightarrow j}^* P_{j+1}(t) + \omega_{j-1 \rightarrow j}^* P_{j-1}(t) - \omega_{j \rightarrow j+1}^* P_j(t) - \omega_{j \rightarrow j-1}^* P_j(t) \\ \frac{dC_{ij}^*(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P_j(t) - \lambda_i C_{ij}^*(t) \\ P_j(t) = E_f \Sigma_f V_j v n_j(t) \\ C_{ij}^*(t) = E_f \Sigma_f V_j v C_{ij}(t) \\ \omega_{j+1 \rightarrow j}^* = \frac{Dv}{\Delta Hd} \frac{P_{j+1}(0)}{P_j(0)} P_{\text{обм}} \\ \omega_{j-1 \rightarrow j}^* = \frac{Dv}{\Delta Hd} \frac{P_{j-1}(0)}{P_j(0)} P_{\text{обм}} \\ \omega_{j \rightarrow j+1}^* = \frac{Dv}{\Delta Hd} \frac{P_j(0)}{P_{j+1}(0)} P_{\text{обм}} \\ \omega_{j \rightarrow j-1}^* = \frac{Dv}{\Delta Hd} \frac{P_j(0)}{P_{j-1}(0)} P_{\text{обм}} \\ j = 1..10 \end{array} \right. \quad (7)$$

где E_f – энергия, выделяющаяся при делении (Дж);

E_f – макроскопическое сечение деления урана-235 (см^{-1});

V_j – объем j -го узла (см^3).

Математическая модель ОР СУЗ для многоточечной модели

Математическая модель и передаточная функция 12 группы ОР СУЗ получены авторами в статье «Применение нечетких регуля-

торов для управления мощностью ядерного реактора ВВЭР-1200» [21] на основе экспериментальных данных интегральной эффективности. Однако, при использовании многоточечного подхода необходимо учитывать различное воздействие при перемещении органов регулирования – 12 группы ОР СУЗ на соответствующие точечные модели, при этом сохранив возможность описания вносимой реактивности системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого

порядка. Так как характеристика стержней является нелинейной по высоте, то для дальнейшего упрощения максимальная реактивность, внесенная ОР СУЗ совокупно в систему при определенном положении, принята равной $\rho_1^{tot} \dots \rho_j^{tot}, j \in (1; 10)$.

Как отмечалось выше, в работах [13,15] используется четырехточечная модель, однако воздействие ОР СУЗ на различные узлы

описывается отдельными уравнениями, не входящими в единую систему. Схожий подход, но только для двух узлов, можно найти в [12,14]. Для устранения данных недостатков была использована комбинация функций знака sign, и при использовании четырех узлов математическая модель 12 группы ОР СУЗ может быть записана в виде (8):

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = G_r h_0 (1 + \text{sign}(h)) \\ \frac{d\rho_1^{av}}{dt} = G_r \rho_1^{tot} \left(1 + \text{sign}\left(h - \frac{3h_0}{4}\right)\right) \\ \frac{d\rho_2^{av}}{dt} = G_r (\rho_2^{tot} - \rho_1^{tot}) \left(1 - \text{sign}\left(h - \frac{3h_0}{4}\right)\right) \left(1 + \text{sign}\left(h - \frac{h_0}{2}\right)\right) \\ \frac{d\rho_3^{av}}{dt} = G_r (\rho_3^{tot} - \rho_2^{tot}) \left(1 - \text{sign}\left(h - \frac{h_0}{2}\right)\right) \left(1 + \text{sign}\left(h - \frac{h_0}{4}\right)\right) \\ \frac{d\rho_4^{av}}{dt} = G_r (\rho_4^{tot} - \rho_3^{tot}) \left(1 - \text{sign}\left(h - \frac{h_0}{4}\right)\right) (1 + \text{sign}(h)) \end{cases} \quad (8)$$

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

h_0 – высота активной зоны реактора ВВЭР-1200;

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

$\rho_1^{av}, \rho_2^{av}, \rho_3^{av}, \rho_4^{av}$ – средняя вносимая реактивность 12 группой ОР СУЗ в 1, 2, 3 и 4 узлы, соответственно.

На рисунке 3 приведен пример аппроксимации модели 12 группы ОР СУЗ на 100% и 90% уровне мощности с использованием метода наименьших квадратов полиномами пятой степени, а также с помощью кусочно-линейных функций для четырехточечной модели.

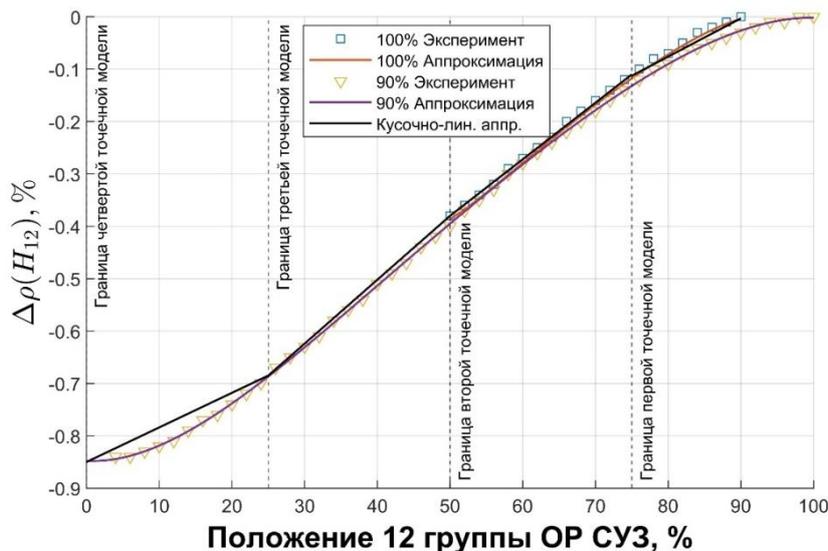


Рисунок 3. Аппроксимация значений интегральной эффективности 12 группы ОР СУЗ
Figure 3. Approximation of the group 12 of CPS CR integral worth

На рисунке 4 представлены результаты моделирования при полном вводе модели

(8) группы ОР СУЗ с 90% положения в течение 5000 секунд.

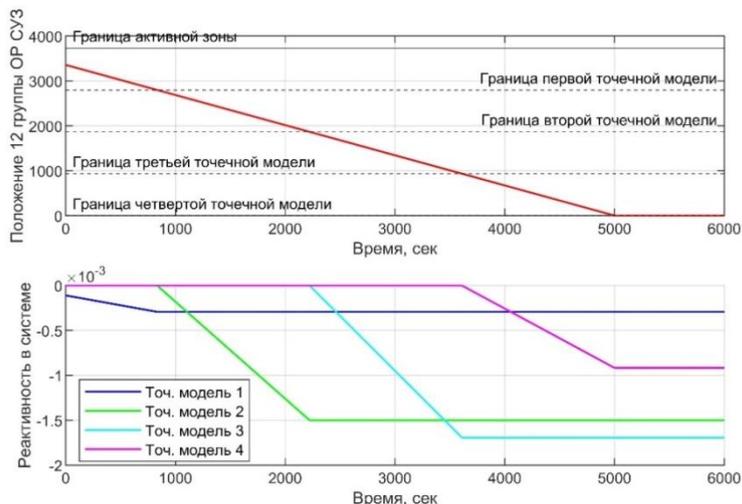


Рисунок 4. Поведение модели (8) 12 группы ОР СУЗ при полном введении в активную зону, состоящую из 4 аксиальных точек

Figure 4. The behavior of the model (8) of the group 12 of CPS CR while the full insertion to the reactor core consisting of 4 axial points

Значения реактивностей, внесенных в систему путем перемещения ОР СУЗ ρ_j^{tot} , полученные на основе экспериментальных данных, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Максимальное значение реактивности в системе при перемещении ОР СУЗ

Table 3. Maximum value of the reactivity in the system while moving the CPS CR

Число узлов	Значение реактивности, 10^{-2} / расположение точки, %											
	ρ_1^{tot}	ρ_2^{tot}	ρ_3^{tot}	ρ_4^{tot}	ρ_5^{tot}	ρ_6^{tot}	ρ_7^{tot}	ρ_8^{tot}	ρ_9^{tot}	ρ_{10}^{tot}	$\rho_{0,1h}$	
2	-0.38 (50%)	-0.85 (0%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.036
4	-0.11 (75%)	-0.38 (50%)	-0.685 (25%)	-0.85 (0%)	-	-	-	-	-	-	-	0.036
6	-0.052 (83.3%)	-0.2 (66.6%)	-0.38 (50%)	-0.58 (33.2%)	-0.77 (16.5%)	-0.85 (0%)	-	-	-	-	-	0.036
8	-0.02 (87.5%)	-0.11 (75%)	-0.24 (62.5%)	-0.38 (50%)	-0.53 (37.5%)	-0.68 (25%)	-0.8 (12.5%)	-0.85 (0%)	-	-	-	0.036
10	-0.003 (90%)	-0.07 (80%)	-0.16 (70%)	-0.27 (60%)	-0.38 (50%)	-0.51 (40%)	-0.62 (30%)	-0.74 (20%)	-0.82 (10%)	-0.85 (0%)	-	0.036

Результаты моделирования и выводы

Моделирование проводилось в среде MATLAB Simulink. Так как комбинация систем (7) и (8) представляет собой «жесткую» систему, то необходимо использовать численные алгоритмы, адаптированные под такой тип задач. В данной работе используется решатель ode15s – многшаговый метод переменного порядка (Variable Step, Variable Order, VSVO). Моделирование проводилось в два этапа:

1) первой производилась оценка влияния числа групп (1, 3, 6, 8) запаздывающих нейтронов на четырехточечной модели кинетики и выбиралось их оптимальное количество, результаты приведены в таблице 4.1 и на рисунке 5.1;

2) затем производилось моделирование с оптимальным количеством групп запаздывающих нейтронов на двух, четырех, шести, восьми и десятиточечной модели, результаты представлены в таблице 4.2 и на рисунке 5.2.

Тест состоял в моделировании перемещения модели 12 группы ОР СУЗ и разгрузки реактора с уровня мощности 100% до уровня мощности 85%.

Адекватность предложенных моделей оценивалась по метрикам MAE (Mean Absolute Error) и RMSE (Root Mean Squared Error) для значений мощности и аксиального оффета, которые определяются по формулам (9.1) и (9.2) соответственно:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{\text{мод}} - y_{\text{экс}}| \quad (9.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{мод}} - y_{\text{эксп}})^2} \quad (9.2)$$

где $n = 8$ – число точек измерений;

$y_{\text{мод}}$ – результаты модели;

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

Также важным является сравнение положения ОР СУЗ на тренажере в установившемся режиме при снижении мощности с данными, полученными в результате моделирования. Оценка производилась по отно-

сительной погрешности RE (Relative Error), определяемой формулой (9.3) соответственно:

$$RE = \frac{|y_{\text{эксп}} - y_{\text{мод}}|}{y_{\text{эксп}}} \quad (9.3)$$

где $y_{\text{эксп}}$ – результаты эксперимента с многофункционального тренажера (положение ОР СУЗ 60% на уровне мощности 85%);

$y_{\text{мод}}$ – положение ОР СУЗ по результатам моделирования.

Таблица 4.1. Результаты моделирования для четырехточечной модели кинетики с разным числом групп запаздывающих нейтронов (тест №1)

Table 4.1. The results of modelling for four-point kinetics approximation with different number of delayed neutron groups (test №1)

Модель	TRT, сек				MAE		RMSE		RE
	CPU1	CPU2	CPU3	CPU4	Axial offset	Power	Axial offset	Power	CPS CR
4 узла 1 группа запаздывающих нейтронов	0.3200	3.0723	0.6048	0.7038	3.0125	0	3.2895	0	0.213
4 узла 3 группы запаздывающих нейтронов	0.4328	3.5691	0.7266	0.9696	2.9838	0	3.2561	0	0.213
4 узла 6 групп запаздывающих нейтронов	0.6293	4.8407	1.2668	1.4826	2.9225	0	3.1959	0	0.213
4 узла 8 групп запаздывающих нейтронов	0.7524	5.2671	1.3642	1.7530	2.9200	0	3.1927	0	0.213

Таблица 4.2. Результаты моделирования для многоточечных моделей с различным числом аксиальных узлов (тест №2)

Table 4.2. The results of modelling for multipoint models with different number of axial nodes (test №2)

Модель	TRT, сек				MAE		RMSE		RE
	CPU1	CPU2	CPU3	CPU4	Axial offset	Power	Axial offset	Power	CPS CR
2 узла 3 группы запаздывающих нейтронов	0.1469	1.2881	0.5126	0.3386	4.8225	0	6.0251	0	0.856
4 узла 3 группы запаздывающих нейтронов	0.4328	3.5691	0.7266	0.9696	2.9838	0	3.2561	0	0.213
6 узлов 3 группы запаздывающих нейтронов	0.5813	4.9977	1.1942	1.5229	4.6363	0	5.2095	0	0.024
8 узлов 3 группы запаздывающих нейтронов	0.8270	6.0983	1.5366	1.9397	3.8384	0	4.5270	0	0.063
10 узлов 3 группы запаздывающих нейтронов	1.3762	7.3353	1.9844	2.6637	3.5946	0	4.2861	0	0.138

Дополнительно проводился замер времени моделирования в MATLAB с использованием функции tic-toc на различных ПК (Total Running Time, TRT). На основе результатов 5 запусков определялось среднее время и полученный результат заносился в таблицы 4.1

и 4.2. В таблицах 4.1 и 4.2 под CPU№1 следует понимать Intel Core i5-13500H (2.6 GHz), под CPU№2 понимать Intel Core i3 6006u (2.0 GHz), под CPU№3 понимать AMD Ryzen 5 5600H (3.3 GHz), и под CPU №4 понимать AMD Ryzen 5 1600 (3.2 GHz).

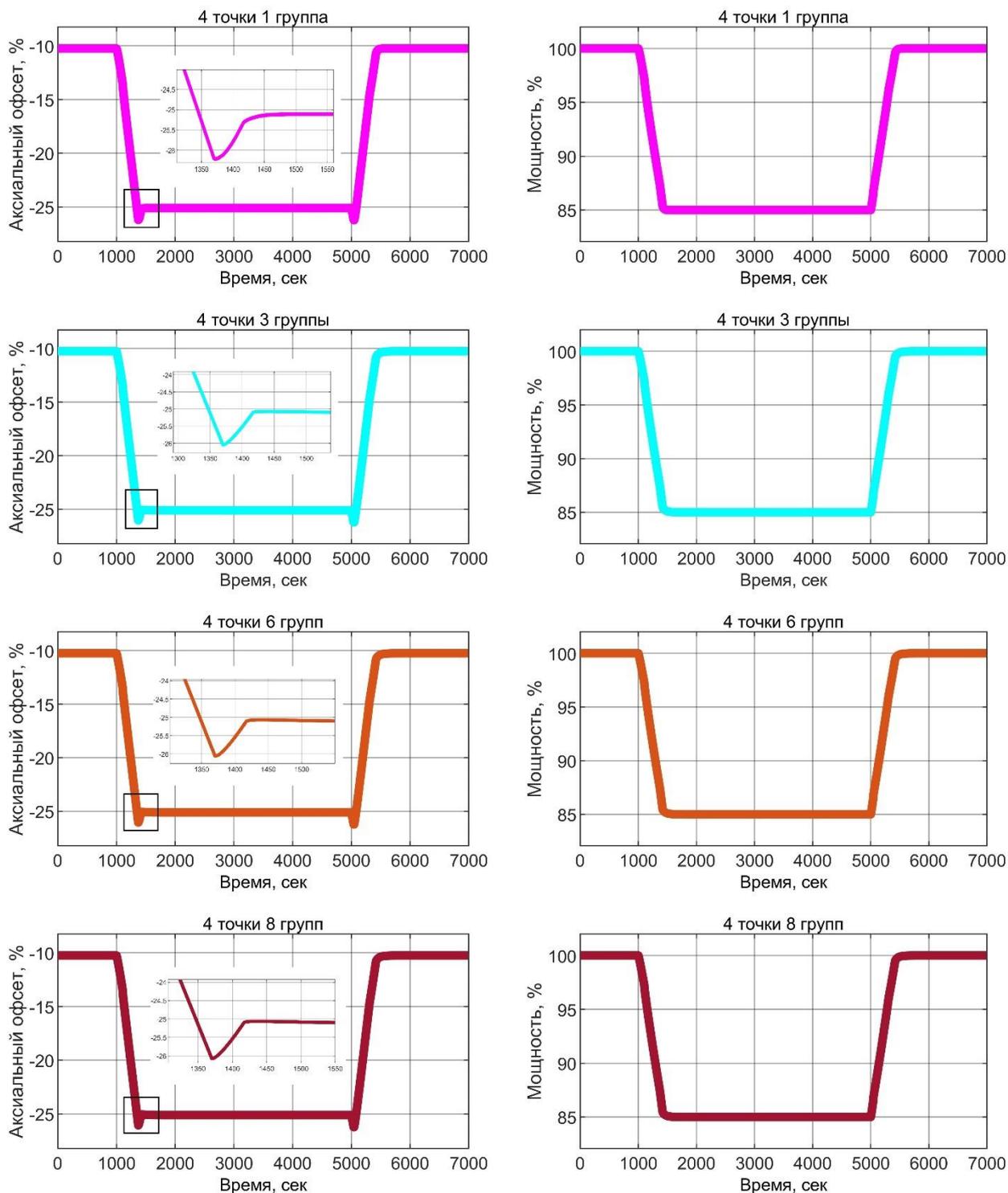


Рисунок 5.1. Значения мощности (справа) и аксиального офсета (слева) при различном числе групп запаздывающих нейтронов

Figure 5.1. Values of the power (right) and axial offset (left) for different number of delayed neutrons groups

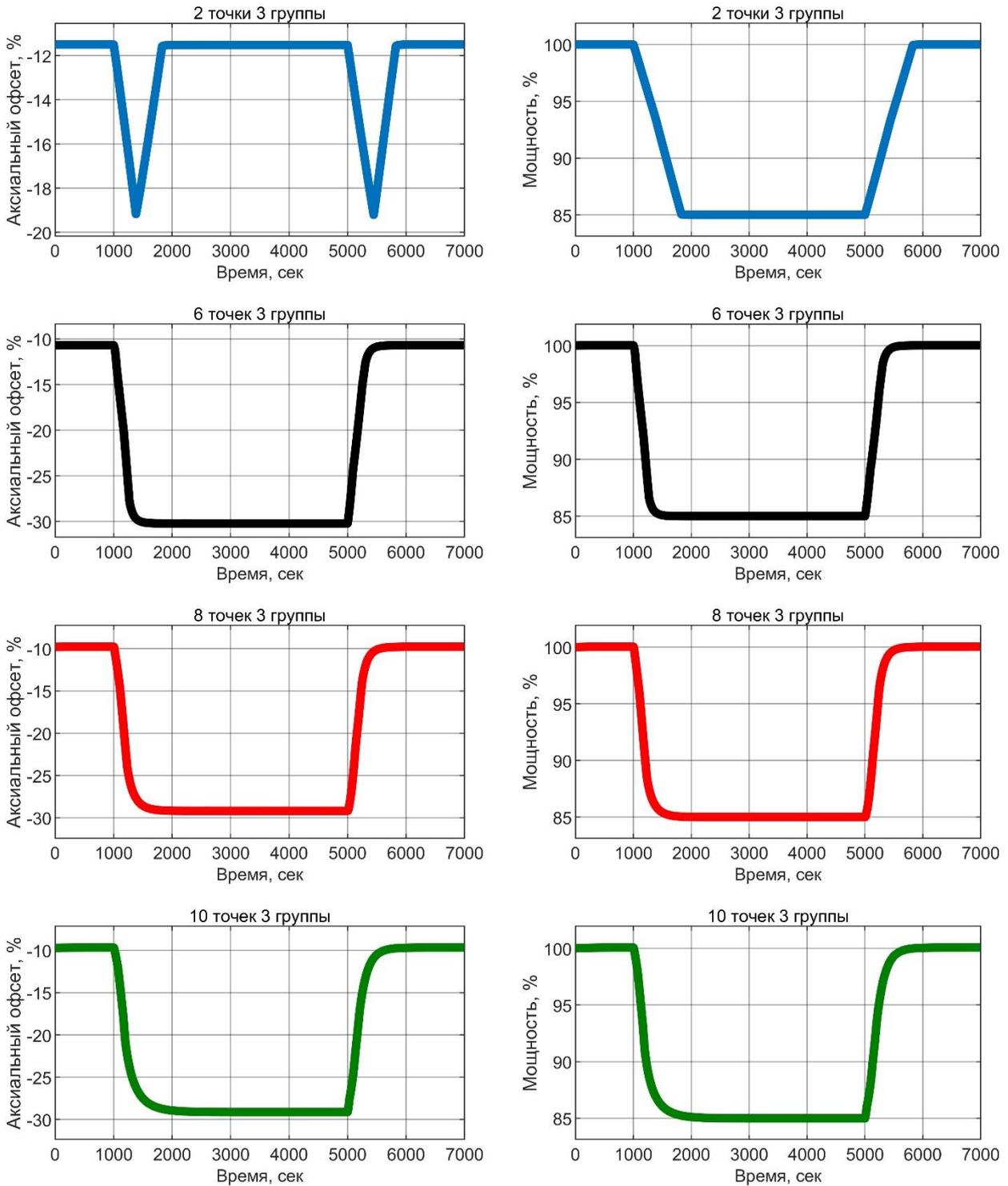


Рисунок 5.2. Значения мощности (справа) и аксиального офсета (слева) при различном числе аксиальных точек

Figure 5.2. Values of the power (right) and the axial offset (left) for different number of axial points

Исходя из результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1) увеличение числа групп запаздывающих нейтронов приводит к более точным результатам в динамических режимах, однако значительно увеличивает время моделирования, поэтому 3 группы запаздывающих нейтронов можно считать оптимальным вариантом для моделирования переходных процессов;

2) увеличения числа точек в аксиальном направлении приводит к увеличению точности результатов моделирования, хотя оптимальным вариантом может быть выбрана модель, состоящая из 4 точек (наименьшие ошибки RMSE и MAE по аксиальному офсету). Дальнейшее увеличение нецелесообразно, так как значительно возрастает коэффициент взаимосвязи ω (для двух точек $\omega \sim 0.01$, для 8 $\omega \sim 0.16$, и для 10 $\omega \sim 0.25$), что вызывает перераспределение мощности между узлами еще до начала переходного процесса, а также не приводит к существенному увеличению точности моделирования аксиального офсета;

3) наиболее точное положение модели 12 группы ОР СУЗ было получено по результатам моделирования на шеститочечной модели (RE=0.024), однако отличие от восьмиточечной незначительно (RE=0.063). Использовать же двухточечную модель не рекомендуется в силу того, что присутствует значительное отклонение положения ОР СУЗ от экспериментального (RE=0.856).

Заключение

В данной работе предложена многоточечная модель реактора ВВЭР-1200, которая может быть использована при анализе переходных процессов и синтезе системы автоматического регулирования мощности, а также модель органов регулирования, полученная на основе кусочно-линейной аппроксимации экспериментальных данных интегральной эффективности 12 группы ОР СУЗ, которая может воздействовать на точечные модели последовательно при вводе. Исследовано влияние числа групп запаздывающих нейтронов на точность модели в динамических режимах и обосновано, что модель с 3 группами позволяет получать близкие к экспериментальным результаты, и при этом экономит время вычислений. Оптимальное число точек для моделирования режима следования за нагрузкой составляет 4.

Для дальнейшего улучшения точности расчетов возможно комбинировать предложенную модель с расширенной моделью теплогидравлических процессов Р. Манна, а также рассмотреть обратную связь по ксенону-135 для суточных маневренных режимов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Henry A. The application of reactor kinetics to the analysis of experiments. *Nuclear Science and Engineering*. 1958;3(1):52–70. <https://doi.org/10.13182/NSE58-1>
2. Соловьёв Д.А., Хачатрян А.Г., Чернов Е.В., Аль Малкави Р.Т. Исследование алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2022;2:37–48. <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.04>
3. Soloviev D.A., Khachatryan A.G., Chernov E.V., Al Malkawi R.T. Investigation of Algorithms for Suppressing Xenon Oscillations in a VVER-1200 Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022;2:37–48. <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.04>
3. Avery R. Theory of coupled reactors. In: *Proc. 2nd UN Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy*, United Nations. 1958. Vol. 12. P. 182. <https://doi.org/10.2172/4315469>

4. Belleni-Morante A. The kinetic behaviour of a reactor composed of G loosely coupled cores: Integral formulation. *Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology*. 1964;18(10):547–559. [https://doi.org/10.1016/0368-3230\(64\)90139-9](https://doi.org/10.1016/0368-3230(64)90139-9)
5. Kobayashi K. Rigorous derivation of multi-point reactor kinetics equations with explicit dependence on perturbation. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1992;29(2):110–120. <https://doi.org/10.1080/18811248.1992.9731503>
6. Valocchi G., Tommasi J., Ravetto P. Reduced order models in reactor kinetics: A comparison between point kinetics and multipoint kinetics. *Annals of Nuclear Energy*. 2020;147:107702. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107702>
7. Zhe Dong, Xiaojin Huang, Liangju Zhang A nodal dynamic model for control system design and simulation of an MHTGR core. *Nuclear Engineering and Design* 240 (240), 1251-261. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.032>
8. Wang P.F., Liu Y., Jiang B.T., Wan J.S., Zhao F.Y. Nodal dynamics modeling of AP1000 reactor for control system design and simulation. *Annals of Nuclear Energy*. 2013;62:208–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2013.05.036>
9. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K. Nodal models of Pressurized Water Reactor core for control purposes – A comparison study. *Nuclear Engineering and Design*. 2017;322:444–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.005>
10. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K. Multi-nodal PWR reactor model – Methodology proposition for power distribution coefficients calculation. *21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. Poland: Miedzyzdroje, 2016. P. 385–390. <https://doi.org/10.1109/MMAR.2016.7575166>
11. Žerovnik G., Čalič D., Gerkišič S., Kromar M., Malec J., Mihelčič A., Trkov A., Snoj L. An overview of power reactor kinetics and control in load-following operation modes. *Frontiers in Energy Research*. 2023;11:1111357. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1111357>
12. Mousakazemi S.M.H. Control of a pressurized light-water nuclear reactor two-point kinetics model with the performance index-oriented PSO. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021;53(8):2556–2563 <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.018>
13. Zaidabadi nejad M., Ansarifar G.R. Adaptive robust control for axial offset in the P.W.R nuclear reactors based on the multipoint reactor model during load-following operation. *Annals of Nuclear Energy*. 2017;103:251–264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.01.025>
14. Aftab A., Luan X. A Takagi Sugeno based reactor power control of VVER-1000 using linear parameter varying identification of two-point kinetic model. *Progress in Nuclear Energy*. 2021;140:103905. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103905>
15. Abdurraheem K.K., Tolokonsky A.O., Laidani Z. Adaptive second order sliding mode control for a pressurized water nuclear reactor in load following operation with Xenon oscillation suppression. *Nuclear Engineering and Design*. 2022;391:111742 <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111742>
16. Spriggs G.D., Campbell J.M., Piksaikin V.M. An 8-group delayed neutron model based on a consistent set of half-lives. *Progress in Nuclear Energy*. 2002;41(1-4):223–251. [https://doi.org/10.1016/s0149-1970\(02\)00013-6](https://doi.org/10.1016/s0149-1970(02)00013-6)
17. Skinner R.E., Cohen E.R. Reduced Delayed Neutron Group Representations. *Nuclear Science and Engineering*. 1959;5(5):291–298. <https://doi.org/10.13182/NSE59-A25601>
18. Вольман М.А. Имитационное моделирование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в реакторах ВВЭР-1000. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации*. Москва, 2017. 135 с. EDN NTLFZT. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008925788> (дата обращения: 10.04.2024).
- Volman M.A. Imitacionnoe modelirovanie nejtronno-fizicheskikh i teplogidravlicheskikh processov v reaktorakh VVEHR-1000. *Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk po special'nosti 05.14.03 Yadernye ehnergeticheskie ustanovki, vkljuchaya proektirovanie, ehkspluataciju i vyvod iz ehkspluatacii*. Moscow, 2017. 135 p. EDN NTLFZT. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008925788> (accessed: 10.04.2024).
19. Казанский Ю.А., Слекенич Я.В. Мощностной коэффициент реактивности: определение, связь с коэффициентами реактивности, оценка результатов переходных процессов энергетических реакторов. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2018;1:63–74. <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.07>

Kazansky Yu.A., Slekenichs Ya.V. Power coefficient of reactivity used for assessing the results of transients in power reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018;1:63–74. <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.07>

20. Правосуд С.С., Маслаков Д. С., Якубов Я. О., Овчеренко А.А. Верификация модели динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящей из одного топливного узла, примыкающего к двум узлам теплоносителя. *Глобальная Ядерная Безопасность*. 2023;13(3):82–95. EDN: YBZMTK. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>

Pravosud S.S., Maslakov D.S., Yakubov Ya.O., Ovcherenko A.A. Verification of the WWER-1200 reactor dynamic model consisting of one-fuel unit adjacent to two coolant units. *Global Nuclear Safety*. 2023;13(3):82–95 (In Russ.). EDN: YBZMTK. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>

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

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

ВКЛАД АВТОРОВ:

Правосуд С.С. – постановка задачи и руководство работой, разработка методологии исследования, анализ литературных источников, работа на тренажёре, обработка экспериментальных данных, моделирование, верификация и оформление результатов, написание работы;

Якубов Я. О. – анализ литературы, написание скриптов;

Сусакин В.А. – анализ литературы, написание скриптов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Pravosud S.S. – problem statement and supervision, development of the research methodology, literature review, working on the simulator, experimental data proceeding, scripts' writing, results verification, and their visualization, writing of the original paper.

Yakubov. Ya.O. – literature review, scripts' writing;

Susakin V.A. – literature review, scripts' writing.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

FUNDING:

No additional finding is involved in the research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no relevant conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Сергеевич Правосуд, инженер по подготовке персонала 1 категории учебно-методического центра «Ядерная и радиационная безопасность» АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл.; преподаватель кафедры «Электроника и автоматика физических установок» СТИ НИЯУ «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru,

SSPravosud@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

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

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

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru,

SSPra-vosud@mephi.ru

Ярослав Олегович Якубов, студент кафедры «Электроника и автоматика физических установок», Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3461-0476>

e-mail: yarik.tomsk@yandex.ru

Владислав Александрович Сусакин, студент кафедры «Машины и аппараты химических и атомных производств», Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2492-3186>

e-mail: bvp8ee6k@gmail.com

Yaroslav O. Yakubov, student of the Department of Electronics and Automatics of Physical Facilities, Seversk Technological Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3461-0476>

e-mail: yarik.tomsk@yandex.ru

Vladislav A. Susakin, student of the Department of Machinery and Apparatus of Chemical and Atomic Enterprises, Seversk Technological Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2492-3186>

e-mail: bvp8ee6k@gmail.com

Поступила в редакцию 28.04.2024

После доработки 31.05.2024

Принята к публикации 04.06.2024

Received 28.04.2024

Revision 31.05.2024

Accepted 04.06.2024

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 331.108:620.9

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02-8>

EDN MYBUKS

Оригинальная статья / Original paper



Укомплектованность кадрами электроэнергетики Российской Федерации
в условиях цифровой трансформации

Н.К. Савельева , А.А. Созинова , М.В. Макарова  

Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация

 usr21824@vyatsu.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема реализации процесса цифровизации энергетической отрасли, на примере группы компаний «Россети», партнера государственной корпорации «Росатом» в области ИТ-разработок, с точки зрения укомплектованности персоналом в условиях актуального состояния рынка трудовых ресурсов. Целью научно-исследовательской работы является разработка релевантных механизмов, поиска современных инструментов управления персоналом в условиях цифровой трансформации электросетевого комплекса Российской Федерации. Научная новизна исследования сводится к следующим положениям: систематизированы основные направления цифровизации электросетевой компании, на основании которых смоделирован организационно-экономический механизм процесса цифровой трансформации электросетевой компании; предложена классификация современных инструментов бизнес-процесса управления персоналом электросетевой компании. **Методология и методы.** Для исследования тенденций процесса цифровизации электросетевых компаний использовались общенаучные методы (теоретический анализ научных трудов, эмпирический, логический, метод классификации и моделирования). Проведен обзор публикаций, который позволил определить предметную область исследовательской работы. **Результаты.** Рассмотрены основные процессы внутри электросетевой компании, которые будут трансформироваться в процессе цифровизации, на примере Группы компаний «Россети». С учетом рассмотренных направлений цифровизации деятельности, сформулирован организационно-экономический механизм процесса цифровизации электросетевой компании отличающийся обоснованием авторского определения цифровизации масштабе энергетической отрасли. Определена роль качественной кадровой укомплектованности в реализации цифровых процессов и деятельности электросетевых компаний и обозначены специфические требования к соискателям, характерные для энергетической отрасли. Рассмотрена структура бизнес-процесса управление персоналом, для каждого подпроцесса подобраны цифровые инструменты, которые будут способствовать повышению показателей укомплектованности персоналом и эффективности использования трудовых ресурсов электросетевой компании. **Обсуждение.** Эффективная кадровая политика, направленная на максимальную укомплектованность компании квалифицированными кадрами, является одним из ключевых решений в повышении надежности и устойчивости энергетической отрасли в период цифровизации. Стандартные инструменты в области кадрового дела могут оказаться не работоспособными в условиях как демографического кадрового дефицита, так и сложившейся миграции трудовых ресурсов в оборонную и военную отрасль. Требуется постоянная адаптация используемых методик и практик управления персоналом с учетом цифровизации данного бизнес-процесса и вызовов, которые стоят перед энергетической отраслью РФ в настоящее время.

Ключевые слова: энергетическая отрасль, цифровизация, электросетевые компании группы «Россети», укомплектованность персоналом.

Для цитирования: Савельева Н.К., Созинова А.А., Макарова М.В. Укомплектованность кадрами электроэнергетики Российской Федерации в условиях цифровой трансформации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):91–102. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-08>

For citation: Savelyeva N.K., Sozinova A.A., Makarova M.V. Staffing of the electric power industry of the Russian Federation under conditions of digital transformation. *Global nuclear security*. 2024;14(2):91–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-08>

Staffing of the electric power industry of the Russian Federation under conditions of digital transformation

Nadezhda K. Savelyeva , Anastasia A. Sozinova  , Maria V. Makarova 

Vyatka State University, Kirov, Russia

 usr21824@vyatsu.ru

Abstract. The article considers the problem of implementing the process of digitalization of the energy industry, using the example of the Rosseti group of companies, a partner of the state corporation Rosatom in the field of IT development, from the point of view of staffing in the current state of the labour market. The purpose of the research work is to develop relevant mechanisms, search for modern personnel management tools in the context of digital transformation of the electric grid complex of the Russian Federation. The scientific novelty of the research is reduced to the following provisions: the main directions of digitalization of an electric grid company are systematized, on the basis of which the organizational and economic mechanism of the process of digital transformation of an electric grid company is modelled; a classification of modern tools of the business process of personnel management of an electric grid company is proposed. **Methodology and methods.** To study trends in the digitalization process of electric grid companies, general scientific methods are used (theoretical analysis of scientific works, empirical, logical, classification and modelling methods). A review of publications is carried out, which made it possible to determine the subject area of the research work. **Results.** The main processes within the electric grid company that will be transformed in the process of digitalization are considered, using the example of the Rosseti Group of Companies. Taking into account the considered areas of digitalization of activities, an organizational and economic mechanism of the digitalization process of an electric grid company has been formulated, which is distinguished by the rationale for the author's definition of digitalization on the scale of the energy industry. The role of high-quality staffing in the implementation of digital processes and activities of electric grid companies is determined and specific requirements for applicant's characteristic of the energy industry are identified. The structure of the human resource management business process is considered, digital tools are selected for each subprocess that will help improve staffing levels and the efficiency of using labour resources of the electric grid company. **Discussion.** An effective personnel policy aimed at maximizing the company's staffing with qualified personnel is one of the key solutions in increasing the reliability and sustainability of the energy industry during the period of digitalization. Standard tools in the field of personnel management may not work in the context of both a demographic personnel shortage and the current migration of labour resources to the defence and military industries. Constant adaptation of the used methods and practices of personnel management is required, taking into account the digitalization of this business process and the challenges that the energy industry of the Russian Federation currently faces.

Keywords: energy industry, digitalization, power grid companies of the Rosseti group, staffing levels.

Введение

Энергетическая отрасль занимает особое место в национальной экономике, являясь одновременно производителем, экспортером и потребителем энергетических ресурсов. Цели развития отрасли можно сформулиро-

вать по двум направлениям: с одной стороны, энергетическая отрасль, как базовая инфраструктура должна максимально содействовать социально-экономическому развитию и повышению благосостояния граждан России, с другой стороны, поддерживать лидер-

ство на глобальном рынке, в рамках уклада мировой энергетики, сформированного еще в 20 веке. Активные процессы реформирования и цифровой трансформации всех базовых отраслей экономики диктуют новые тренды в развитии компаний. Структурные преобразования в электроэнергетике должны способствовать повышению устойчивости функционирования компаний и эффективности производства, своевременной передаче и сбыту электрической энергии на основе единства сетевой и технологической инфраструктуры энергетического рынка, демополизации потенциально конкурентных секторов производства и сбыта электроэнергии. Мероприятия должны учитывать все реальные, в том числе и технические особенности энергетической системы, а также условия кадрового дефицита в условиях миграции трудовых ресурсов в прочие отрасли отечественной экономики. В качестве объекта исследования выступает компания «Россети», партнер государственной корпорации в области ядерной энергетики «Росатом». Группа компаний «Россети» – крупнейший электросетевой холдинг, активно реализующий концепцию цифровой трансформации, а также разрабатывающий передовые решения в сфере ИТ-технологий и операционных систем, о чем свидетельствует заключенное партнерское соглашение с «Росатомом». Реализации данных ИТ-разработок формирует потенциал для развития технологического суверенитета национальной энергетики и создание организационных механизмов обеспечения процессов импортозамещения.

Методология и методы

Для исследования тенденций процесса цифровизации электросетевых компаний использовались общенаучные методы (теоретический анализ научных трудов, эмпирический, логический, метод классификации и моделирования). Проведен обзор публикаций, который позволил определить предметную область исследовательской работы.

Анализ научной литературы по заявленной тематике показал высокую степень разработки проблемы. Среди научных трудов, раскрывающих вопросы функционирования электроэнергетической отрасли, целесообразно отметить работы коллективное исследование [1], посвященное аспектам анализа и оценки готовности энергетической отрасли к цифровизации. Возможности реализации и риски при цифровизации современных компаний ранее рассматривались авторами в научной работе [2]. Исследованию специфических черт электроэнергетической отрасли России, которые определяют приоритетный характер цифровизации этой экономической сферы описали Иваненко О.Б. и Головкина Е.В. [3]. Загоруйко Т.Н. разрабатывает инструментарий, для реализации стратегии цифровизации, в основу которого заложен уровни цифровизации и функциональные области энергетического предприятия [4]. Сумарокова Ю.Б. отмечает цифровизацию, как один из драйверов развития системы подготовки кадров для энергетической отрасли и указывает на необходимость формирования мультифункционального специалиста для удовлетворения перспективных потребностей рынка труда в электроэнергетике [5]. Внимания заслуживают работы Ковальжина Л.С. [6], Малхасян А.Е. [7], Гаврилова А.С. и Сорокиной Ю.В. [8], Максимова Е.А. [9], раскрывающие аспекты и инструменты управления персоналом в условиях цифровизации. Инновационные инструменты повышения квалификации персонала предложены в коллективной статье [10]. Актуальным вопросам кадрового обеспечения в электроэнергетике посвящена работа Лукманова А.Х. [11]. Необходимость непрерывной подготовки кадров для электроэнергетики обоснована в работе Прокубовской А.О. и Чубарковой Е.В. [12].

В настоящей статье рассмотрена классификация цифровых инструментов, применяемых в управлении персоналом в распределительных сетевых компаниях.

Результаты и обсуждения

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года¹ одной из

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. N 1523-р. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/565068231> (дата обращения: 12.04.2024).

ключевых целей является переход энергетической отрасли на качественно новый уровень, за счет структурной трансформации.

Реализация поставленной цели требует модернизационного рывка в отрасли (рис. 1).



Рисунок 1. Механизм модернизационного рывка энергетической отрасли РФ до 2035 года
[составлено авторами на основе Указа Президента РФ²]

Figure 1. The mechanism of the modernization breakthrough of the energy industry of the Russian Federation until 2035 [compiled by the authors based on the Russian Presidential Decree²]

Анализируя схему модернизационного рывка, можно сделать вывод, что цифровизация – один из основных его инструментов, а концепция цифровизации формулирует смену логики бизнес-процессов компании.

На данном этапе нет единого подхода к определению термина «цифровизация». Очевидно, что цифровизация не есть толь-

ко автоматизация, или установка цифрового оборудования. Давать определение данному термину необходимо с учетом специфики отрасли, в которой она реализуется. Поэтому, предположено рассматривать термин «цифровизация» в узком смысле: под цифровизацией энергетической компании следует понимать выстроенную систему управления, координации и мониторинга деятельности компании на основе цифровых решений, с целью обеспечения надежного и бесперебойного электрообеспечения потребителей.

Анализируя исторический уклад формирования рынков электроэнергетики, следует отметить высокую степень монополизации [13]. В настоящий момент энергети-

² Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (дата обращения: 12.05.2024).

ческая отрасль РФ состоит из конкурентного сектора (генерирующие компании) и монополистического сектора (Федеральная сетевая компания, системный оператор, распределительные сетевые компании, сбытовые компании). В связи с этим, сложились некоторые особенности. Во-первых, все виды деятельности в отрасли взаимосвязаны. Во-вторых, отрасль подвержена государственному ценовому регулированию, с целью достижения паритета интересов и снижение экономического неравенства от деятельности в естественно-монопольных отраслях [14]. В-третьих, огромные по масштабу зоны присутствия компаний, с уникальным оборудованием и особыми требованиями к персоналу. В данном исследовании акцент будет сделан на распределительных сетевых компаниях, так как именно эти компании

содержат всю инфраструктуру по транспортировке энергии от производителя до конечного потребителя.

Крупнейшей электросетевой компанией в РФ и в мире является Группа «Россети» – оператор энергетических сетей, обеспечивающих электроэнергией 82 региона присутствия. В контуре компании находится 45 дочерних обществ, 19 распределительных сетевых компаний, трудовые ресурсы компании составляют порядка 235 тыс. человек. Анализируя многочисленные работы, посвященные данному вопросу и пилотные проекты цифровизации, можно выделить несколько основных направлений деятельности компании ПАО «Россети», которые будут «переходить в цифру», и дать им характеристику (табл. 1).

Таблица 1. Направления цифровизации электросетевой компании [составлено авторами]
Table 1. Directions of the electric grid company digitalization [compiled by the authors]

Процесс	Характеристика
Анализ данных о режимах работы сети, объемах потребления, в режиме реального времени	Построение прогнозной модели поведения сети
	Обеспечение оперативное реагирование на любые неполадки и аварии сети
	Предиктивная аналитика
	Обеспечение справедливой стоимости услуг на электроэнергию
Логика процессов управления	Переход с трехуровневой (Управление – Производственное отделение – Район электрических сетей) системы управления филиалов на двухуровневую (Управление – Район электрических сетей)
	Оптимизация оперативно-технологического управления (Единый Центр Управления Сетями)
	Создание интеллектуальной конфигурации
	Формирование в режиме реального времени балансов мощности электроэнергии
Активно-адаптивная сеть	Автоматическая локация мест повреждения сети
	Управление режимами работы сетей за счет искусственного интеллекта, без участия человека
	Электрическая сеть из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которого изменяются в реальном времени в зависимости от режимов работы энергосистемы
Процессы, раскрывающие потенциал цифровой сети	Выявление потенциальных закономерностей на основе всестороннего анализа данных
	Аналитика данных (энергетический пульс рынка для субъектов РФ)
	Продажи услуг потребителям на энергосервисной основе за счет экономии энергопотребления
Новые сервисы для потребителей	Гибридные системы электроснабжения потребителей
	Тарифное меню
	Просьюмер: потребитель сам потребляет производит и хранит электроэнергию
	Умные дома (управление энергоэффективностью)
	Технологии интернета вещей (цифровые датчики, сенсоры и средства коммуникаций)
	Подключение потребителей по принципу plug and play
Использование «умных» контрактов для расчетов	

Продолжение таблицы 1

Процесс	Характеристика
Кадры и управление персоналом	Аналитические сервисы для потребителей
	Таргетинг потребителей по социально-экономическим данным
	Создание единой информационной системы хранения кадрового и организационно-нормативного документооборота, электронная трудовая книжка, электронное личное дело,
	Создание комплексной системы обучения и адаптации сотрудников
	Применение дистанционных обучающих платформ в рамках корпоративного обучения и развития
	Методики онлайн-рекрутинга
	Гибридный подход к организации труда на предприятии

Таким образом, в основе цифровой трансформации лежит совершенствование единой технической политики компании с учетом необходимых изменений технологических и корпоративных процессов, разработки новых стандартов технического обслуживания. Указанные изменения должны базироваться на онтологической модели деятельности, формирование которой позволит создать и реализовать указанные задачи с учетом требований сетецентрического подхода [15].

С учетом рассмотренных направлений цифровизации деятельности и актуальных авторских исследований [там же 15], на рисунке 2 предложен организационно-экономический механизм процесса цифровизации адаптированный для электросетевой компании.

Инструменты механизма обосновывают необходимость перехода электросетевых компаний на риск-ориентированное управление на основе внедрения цифровых технологий и анализа большого объема данных, что приведет к реализации основной цели цифровой трансформации – оснащение российского рынка современными технологическими решениями, применяя которые компания обеспечит себе конкурентное преимущество.

Одной из основных задач, которые стоят перед компаниями в энергетической отрасли, является обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей, что требует максимально оперативно реагировать на внештатные ситуации. В этой связи, вопрос укомплектованности квалифицированным персоналом является актуальной проблемой,

поскольку кадровый дефицит, который наблюдается в настоящий момент в РФ существенно отражается на таких стратегических показателях электросетевых компаний, как производительность труда, достижение уровня надежности оказываемых услуг, уровень обеспеченности персоналом, повышение инвестиционной активности и другие [16].

Обозначим основные особенности и требования, предъявляемые к кандидатам в электросетевую компанию:

- 1) развития система профессиональных стандартов и единых тарифно-квалификационных справочников для профессий, занятых в электроэнергетике;
- 2) требования к образованию: наличие среднеспециального (для рабочих специальностей) или высшего профессионального (часто, технического) образования (для инженерно-технических и административно-управленческих должностей);
- 3) требования к наличию группы электробезопасности, для работы в электроустановках различной сложности;
- 4) наличие норм и правил профессиональной корпоративной этики, связанных с противодействием коррупции, преступлениям, связанным с хищением электроэнергии, злоупотребления полномочиями и др.;
- 5) высокие требования к соблюдению правил охраны труда.

В качестве инструмента решения проблемы подбора персонала можно рассматривать внедрение процессов цифровизации в бизнес-процесс управления персоналом.

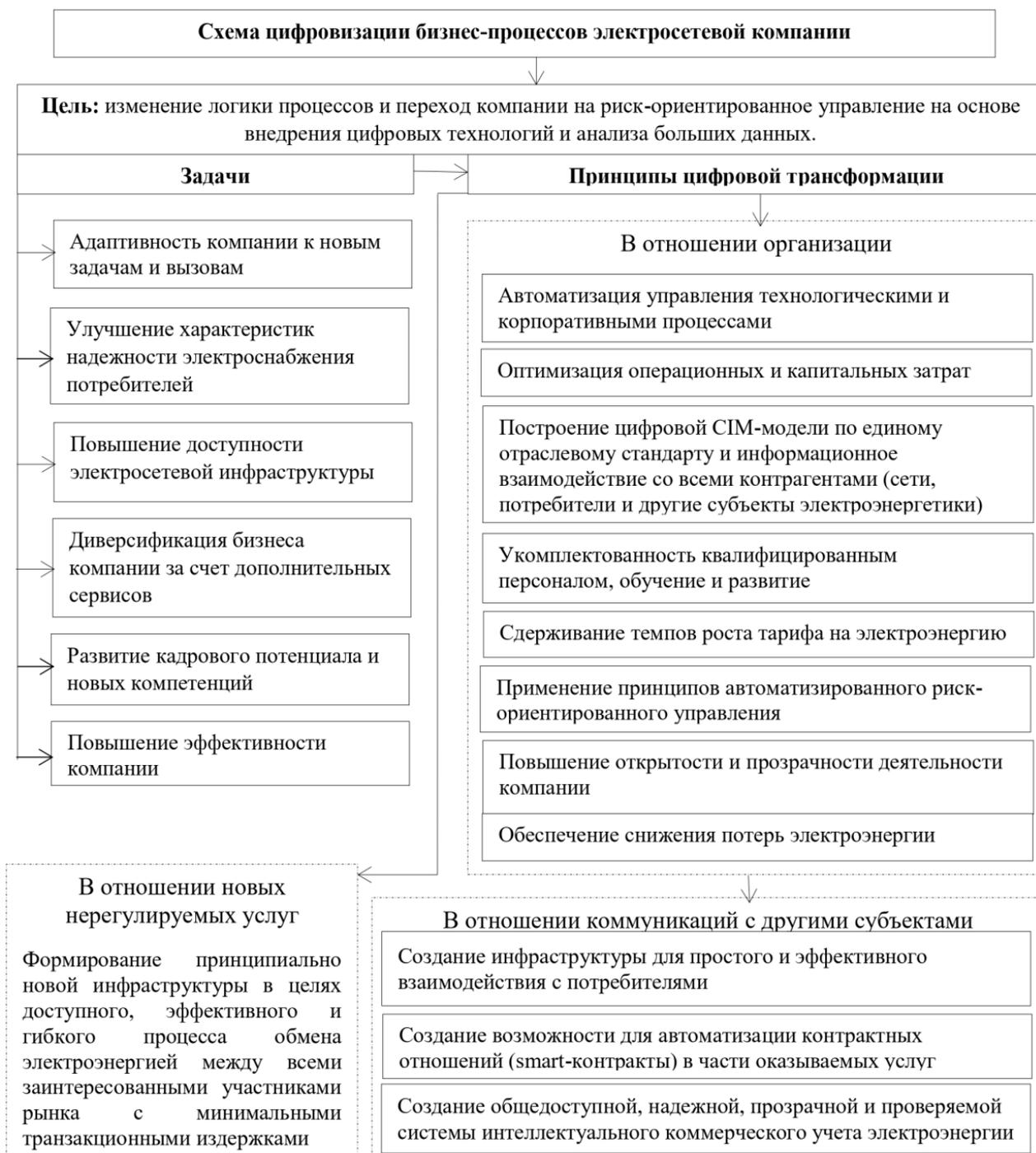


Рисунок 2. Организационно-экономический механизм процесса цифровизации электросетевой компании [составлено авторами]

Figure 2. Organizational and economic mechanism of the electric grid company digitalization [compiled by the authors]

Бизнес-процесс управление персоналом в электросетевой компании обладает некоторой спецификой, связанной с тем, что охрана труда включается в процесс управления трудовыми ресурсами компании. В связи с этим предлагается структурировать бизнес-процесс управление персоналом на четыре подпроцесса: кадровая и

социальная политика, обучение и развитие, охрана труда и мотивация.

Для каждого подпроцесса подобраны цифровые инструменты, которые будут способствовать повышению показателей укомплектованности персоналом и эффективности использования трудовых ресурсов электросетевой компании (табл. 2).

Таблица 2. Классификация цифровых инструментов бизнес-процесса управления персоналом электросетевой компании [составлено авторами]**Table 2.** Digital tools classification of the business process of electric grid company personnel management [compiled by the authors]

Подпроцесс	Инструменты
Кадровая и социальная политика	Автоматизация HR-процессов, интеграция в IT-ландшафт предприятия, за счет синхронизации с системами учета (1С, SAP ER и др.).
	Методики онлайн-рекрутинга.
	Технологии виртуальных собеседований-кейсов, имитирующих реальные условия, соответствующие производственным задачам, в зависимости от категории вакантной должности, которые позволяют оценить квалификацию сотрудника, правильные и ошибочные действия, что исключает субъективный фактор при отборе кандидатов.
	Создание единой информационной системы хранения кадрового и организационно-нормативного документооборота (электронная трудовая книжка, электронное личное дело, должностные инструкции).
	Интранет - создание корпоративного портала или социальной сети для компании. Корпоративный портал объединяет все кадровые коммуникации по подбору, обучению, учету рабочего времени и профилю сотрудника.
Обучение и развитие	Создание комплексной системы обучения и адаптации сотрудников.
	Применение дистанционных обучающих платформ в рамках корпоративного обучения и развития.
	Повышение квалификации в профильных учебных центрах Группы «Россети», адаптация программ обучения под запрос работодателя.
	Система сотрудничества с профильными учебными заведениями в зоне присутствия компании, реализация программ всех видов практики с последующим трудоустройством в Группу «Россети».
	Геймификация – внедрение игровых форматов в качестве обучающих инструментов.
Охрана труда	Всесторонняя реализация концепции «Нулевой травматизм».
	Введение дополнительных мотивационных мер для персонала.
	VR-тренажеры, имитирующие различные виды работ персонала в различных аварийных, и производственных ситуациях (работу под напряжением, на высоте, в условиях непогоды, военных действий и прочие); отработка навыков безопасного ведения всех видов работ в электроустановках и на прочем оборудовании.
	Информационный комплекс для проведения инструктажей и обучений по охране труда с модулем проверки знаний на рабочем месте.
Мотивация	Гибридный подход к организации труда на предприятии.
	Индивидуальный подход к мотивации с точки зрения личных стимулов сотрудника.
	Разработка индивидуальных вариативных моделей карьерных перспектив сотрудника в соответствии с занимаемой должностью, стажем работы и развитием компетенций в результате обучений.
	Применение технологий искусственного интеллекта, для анализа методов работы эффективного персонала с целью создания оптимальной модели трудового поведения и выстраивания траектории обучения сотрудников.
	Применение облачных инструментов для обмена данными и мнениями, командной работе, получения обратной связи от руководителя.
	Внедрение аналитической системы оплаты труда (оценочная шкала эффективности работника), основанной на дифференциации заработной платы персонала в зависимости от сложности выполняемых работ, наличия уникальных компетенций, освоенных смежных профессий, выполнении ключевых показателей эффективности, отсутствии травматизма и других унифицированных параметров оценки.

Таким образом, цифровизация бизнес-процесса управления персоналом, во-первых, способствует ускорению процесса подбора и приема работников, во-вторых, делает прозрачной систему развития и адаптации сотрудника в компании, формируя индивидуальный набор стимулов, в-третьих,

исключает многочисленные рутинные процессы кадрового дела и минимизирует ошибки человеческого фактора. Все это способствует повышению эффективности деятельности электросетевой компании, реализации ее стратегических задач и формированию

ванию новой парадигмы в управлении персоналом.

Вывод

Подводя итог вышеизложенному, необходимо отметить значимость процесса цифровизации для современной энергетической компании. Очевидно, что в рамках сложившегося кадрового дефицита и перераспределения трудовых ресурсов в оборонно-промыш-

ленный комплекс борьба за квалифицированных специалистов будет только усиливаться. Поэтому современные электросетевые компании, в эпоху больших скоростей, обязаны перевести в цифру максимум бизнес-процессов, ускорить процесс укомплектованности и подбора персонала, а также адаптировать систему мотивации к условиям рыночной турбулентности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гибадуллин А.А., Камчатова Е.Ю., Дегтярева В.В., Зеленцова Л.А. Анализ и оценка готовности энергетической отрасли к процессам цифровизации. *Инновации в жизнь*. 2019;(4/31):98–109. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?ysclid=lx1lnkb6oi764779768&id=42214453> (дата обращения: 10.04.2024).

Gibadullin A.A., Kamchatova E.Y., Degtyareva V.V., Zelentsova L.A. Analysis and assessment of the energy industry's readiness for digitalization processes. *Innovations in life*. 2019;(4/31):98–109. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?ysclid=lx1lnkb6oi764779768&id=42214453> (accessed: 10.04.2024).

2. Савельева Н.К. Макарова М.В. Цифровизация современных компаний: возможности реализации и риски. *Креативная экономика*. 2021;15(10):3755–3768. Режим доступа: <https://1economic.ru/lib/113632> (дата обращения: 11.04.2024).

Savelyeva N.K., Makarova M.V. Digitalization of modern companies: implementation opportunities and risks. *Creative Economics*. 2021;15(10):3755–3768. Available at: <https://1economic.ru/lib/113632> (accessed: 11.04.2024).

3. Иваненко О.Б., Головкина Е.В. Цифровая трансформация российской электроэнергетики: перспективы и ограничения. *Экономика, предпринимательство и право*. 2023;13(11):5063–5076. Режим доступа: <https://1economic.ru/lib/119863> (дата обращения: 12.04.2024).

Ivanenko O.B., Golovkina E.V. Digital transformation of the Russian electric power industry: prospects and limitations. *Economics, Entrepreneurship and Law*. 2023;13(11):5063–5076. Available at: <https://1economic.ru/lib/119863> (accessed: 12.04.2024).

4. Загоруйко Т.Н. Стратегия цифровизации предприятия энергетической отрасли. *Журнал прикладных исследований*. 2021;(1-4):82–89. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=62778512> (дата обращения: 12.04.2024).

Zagoruiko, T. N. Strategy of digitalization of the energy industry enterprise. *Journal of Applied Research*. 2021;(1-4):82–89. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=62778512> (accessed: 12.04.2024).

5. Сумарокова Ю.Б. Цифровизация как один из основных драйверов развития системы подготовки кадров для энергетической отрасли. Драйверы развития общего и профессионального образования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Павлово, 16 декабря 2021 года. Павлово: Павловский филиал Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2021. С. 175–178. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hfkzhv&ysclid=lx1m7rmc3a59513680> (дата обращения: 11.04.2024).

Sumarokova Yu.B. Digitalization as one of the main drivers of the development of the personnel training system for the energy industry. Drivers of the development of general and vocational education: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Pavlovo, December 16, 2021. Pavlovo: Pavlovsky branch of the National Research Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky, 2021. P. 175–178. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hfkzhv&ysclid=lx1m7rmc3a59513680> (accessed: 11.04.2024).

6. Ковальжина Л.С. Развитие персонала компании в современных условиях цифровизации инструментов управления персоналом. *Социальные и экономические системы*. 2022; (6-1/30.1).101–113. Ре-

жим доступа: https://www.sesjournal.ru/release/archive/journal/?SECTION_ID=54 (дата обращения: 15.04.2024).

Kovalzhina L.S. Development of the company's personnel in modern conditions of digitalization of personnel management tools. *Social and economic systems*. 2022;(6-1/30.1).101–113. Available at: https://www.sesjournal.ru/release/archive/journal/?SECTION_ID=54 (accessed: 15.04.2024).

7. Малхасян А.Е. Управление персоналом в условиях цифровизации экономики. *Экономика и менеджмент в условиях цифровой трансформации: проблемы, опыт и тенденции*. 2021;230–236. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ullhmx&ysclid=lx1mcfcw11756640853> (дата обращения: 12.04.2024).

Malkhasyan A.E. Personnel management in the context of digitalization of the economy. *Economics and management in the context of digital transformation: problems, experience and trends*. 2021.230–236. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ullhmx&ysclid=lx1mcfcw11756640853> (дата обращения: 12.04.2024).

8. Гаврилов А.С., Сорокина Ю.В. Цифровизация процесса управления персоналом. *Форум молодых ученых*. 2018;(12-2/28):18–19. Режим доступа: <https://www.forum-nauka.ru/arhiv-nomerov> (дата обращения: 15.04.2024).

Gavrilov A.S., Sorokina Yu.V. Digitalization of the personnel management process. *Forum of Young Scientists*. 2018;(12-2/28):18–19. Available at: <https://www.forum-nauka.ru/arhiv-nomerov> (accessed: 15.04.2024).

9. Максимова Е.А. Управление персоналом в эпоху цифровизации. *Via Scientiarum – Дорога знаний*. 2021;(1):73–76. Режим доступа: <https://via-scientiarum.mggeu.ru/category/arhiv/> (дата обращения: 12.04.2024).

Maksimova E.A. Personnel management in the era of digitalization. *Via Scientiarum – The Road of knowledge*. 2021;(1):73–76. Available at: <https://via-scientiarum.mggeu.ru/category/arhiv/> (accessed: 12.04.2024).

10. Орлов К., Охлопков А., Битней В. Повышение квалификации персонала путем внедрения цифровых тренажеров. *Информационные ресурсы России*. 2022;(3/187).46–57. Режим доступа: <https://irr-journal.ru/rubriki/tekhnologii/povyshenie-kvalifikatsii-personala-putem-vnedreniya-tsifrovyykh-tre-nazherov/?ysclid=lx1knpv9zd243119384> (дата обращения: 10.04.2024).

Orlov K., Okhlopkov A., Bitney V. Advanced training of personnel through the introduction of digital simulators. *Information resources of Russia*. 2022;(3/187):46–57. Available at: <https://irr-journal.ru/rubriki/tekhnologii/povyshenie-kvalifikatsii-personala-putem-vnedreniya-tsifrovyykh-trenazherov/?ysclid=lx1knpv9zd243119384>(accessed: 10.04.2024).

11. Лукманов А.Х. Актуальные вопросы кадрового обеспечения и развития кадрового потенциала Энергетической отрасли России. *Труд и социальные отношения*. 2023;34(1):65–72. Режим доступа: <https://atiso.ru/izdat/journal/issues.php> (дата обращения: 10.04.2024).

Lukmanov A.H. Topical issues of staffing and development of the human resources potential of the Energy industry of Russia. *Labor and social relations*. 2023;34(1):65–72. Available at: <https://atiso.ru/izdat/journal/issues.php> (accessed: 10.04.2024).

12. Прокубовская А.О., Чубаркова Е.В. О непрерывной подготовке кадров для электроэнергетики в условиях цифровизации образования. Инженерное мышление: социальные перспективы : Материалы международной междисциплинарной конференции, Екатеринбург, 12–13 февраля 2020 года. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург: ООО Издательство «Деловая книга». С. 161–165. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ynplki&ysclid=lx1mqgllrg874715258> (дата обращения: 10.04.2024).

Prokubovskaya A.O., Chubarkova E.V. On continuous training of personnel for the electric power industry in the context of digitalization of education. *Engineering thinking: social perspectives* : Proceedings of the International Interdisciplinary Conference, Yekaterinburg, February 12–13, 2020. Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. Yekaterinburg: LLC Publishing house «Business Book». P. 161–165. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ynplki&ysclid=lx1mqgllrg874715258> (accessed: 10.04.2024).

13. Савельева Н.К., Данилова М.В. Рынки несовершенной конкуренции в энергетике: модели и перспективы развития. *Теоретическая экономика*. 2020;(7/67):61–68. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44206131&ysclid=lx1lgx04wi509683206> (дата обращения: 15.04.2024).

Savelyeva N.K., Danilova M.V. Markets of imperfect competition in the energy sector: models and prospects of development. *Theoretical economics*. 2020;(7/67):61–68. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44206131&ysclid=lx1lgx04wi509683206> (accessed: 15.04.2024).

14. Савельева Н.К., Созинова А.А., Палешева Н.В. Направления развития методов расчета тарифов в нефтегазовой сфере. *Вектор экономики*. 2021;(12/66). Режим доступа: <https://vectoreconomy.ru/index.php/archive> (дата обращения: 15.04.2024).

Savelyeva N. K., Sozinova A. A., Palesheva N. V. Directions of development of methods for calculating tariffs in the oil and gas sector. *Vector of Economics*. 2021;(12/66). Available at: <https://vectoreconomy.ru/index.php/archive> (accessed: 15.04.2024).

15. Макарова М.В. Обеспечение экономической безопасности компаний на основе оценки их устойчивости в условиях цифровизации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Нижний Новгород, 2021. 23 с. EDN JOJTMJ. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50404657_45559670.PDF (дата обращения 15.04.2024).

Makarova M.V. Ensuring the economic security of companies based on an assessment of their sustainability in the context of digitalization. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Economic Sciences. Nizhny Novgorod, 2021. 23 p. EDN JOJTMJ. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50404657_45559670.PDF (accessed: 15.04.2024).

16. Данилова М.В. Интегральная методика оценки устойчивости филиалов электросетевой компании. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Экономика. Управление. Право*. 2019;19(4):387–393. Режим доступа: <https://eup.sgu.ru/ru/journal/2019/4> (дата обращения: 12.04.2024).

Danilova M.V. Integral methodology for assessing the stability of branches of an electric grid company. *Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Economics. Management. Law*. 2019;19(4):387–393. Available at: <https://eup.sgu.ru/ru/journal/2019/4> (accessed: 12.04.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Савельева Н.К. – анализ существующих направления цифровизации и их интерпретация применительно к электросетевой компании, формулирование выводов;

Созинова А.А. – построение релевантного организационно-экономического механизма процесса цифровизации электросетевой компании; концептуализация статьи.

Макарова М.В. – исследование инновационных цифровых инструментов, применяемых в области управления персоналом. Классификация инструментов с учетом специфики бизнес-процессов электросетевой компании, написание текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Надежда Константиновна Савельева, д.э.н., доцент, директор института, Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9497-6172>
e-mail: nk_savelyeva@vyatsu.ru

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS:

Savelyeva N.K. – analysis of existing directions of digitalization and their interpretation in relation to an electric grid company, formulation of conclusions;

Sozinova A.A. – building a relevant organizational and economic mechanism of the digitalization process of an electric grid company; conceptualization of the article.

Makarova M.V. – research of innovative digital tools used in the field of personnel management. Classification of tools taking into account the specifics of the business processes of an electric grid company, writing the text of an article.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Nadezhda K. Savelyeva, Dr. Sci. (Econ.), Assistant professor, Head of the Institute, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9497-6172>
e-mail: nk_savelyeva@vyatsu.ru

Анастасия Андреевна Созинова, д.э.н., доцент, Заместитель директора по научной деятельности, Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5876-2823>

e-mail: aa_sozinova@vyatsu.ru

Мария Владимировна Макарова, к.э.н., доцент кафедры менеджмента и маркетинга, Вятский государственный университет, г. Киров, Кировская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6175-0054>

e-mail: usr21824@vyatsu.ru

Anastasia A. Sozinova, Dr. Sci. (Econ.), Assistant professor, Deputy Director for Scientific Activities, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5876-2823>

e-mail: aa_sozinova@vyatsu.ru

Maria V. Makarova, Can. Sci. (Econ.), Assistant professor, Department of Management and Marketing, Vyatka State University, Kirov, Kirov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6175-0054>

e-mail: usr21824@vyatsu.ru

Поступила в редакцию 15.04.2024

После доработки 07.06.2024

Принята к публикации 11.06.2024

Received 15.04.2024

Revision 07.06.2024

Accepted 11.06.2024

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 004.8:372. 811.111.1

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02-09>

EDN PBQZPP

Оригинальная статья / Original paper



**Искусственный интеллект в преподавании технического английского
языка студентам-атомщикам**

И.В. Зарочинцева  , **Ю.А. Лупиногина** , **Л.В. Захарова** , **О.А. Кикинчук** 

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

 IVZarochintseva@mephi.ru

Аннотация. В качестве объекта исследования в статье выбраны имеющиеся платформы искусственного интеллекта, используемые при подготовке заданий по техническому английскому языку; способы мотивации к изучению иностранного языка. Предметной областью являются процессы обеспечения мотивации к обучению. Цель исследования – на основе анализа представленных в открытом доступе сведений о существующих способах применения искусственного интеллекта в обучении иностранным языкам, а также проведенного опроса студентов-атомщиков показать возможности и сферы использования искусственного интеллекта в преподавании иностранного языка. В качестве используемых методов при написании статьи выступили теоретический анализ научной литературы, анализ периодики, анализ практического использования искусственного интеллекта в работе преподавателей кафедры иностранных языков, а также данных опроса, проведенного среди студентов технических направлений подготовки ВИТИ НИЯУ МИФИ. Основным результатом исследования выступает вывод о том, что использование искусственного интеллекта позволяет разнообразить дидактический материал, обеспечить мотивацию студентов к овладению техническим английским и пониманию технологических процессов через использование видеоряда.

Ключевые слова: искусственный интеллект, технический английский, дидактический материал, мотивация, аудирование, видеоряд, каналы поступления информации, технологические процессы, визуализация.

Для цитирования: Зарочинцева И.В., Лупиногина Ю.А., Захарова Л.В., Кикинчук О.А. Искусственный интеллект в преподавании технического английского языка студентам-атомщикам. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):103–112. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-09>

For citation: Zarochintseva I.V., Lupinogina Yu.A., Zakharova L.V., Kikinchuk O.A. Artificial intelligence in teaching technical English to nuclear engineering students. *Global nuclear security*. 2024;14(2):103–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-09>

**Artificial intelligence in teaching technical English to nuclear engineering
students**

Irina V. Zarochintseva  , **Yulia A. Lupinogina** ,
Lyubov V. Zakharova , **Olga A. Kikinchuk** 

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

 IVZarochintseva@mephi.ru

Abstract. The paper considers the available artificial intelligence platforms used in the preparation of technical English assignments and the ways of motivation to learn a foreign language as the object of research. The processes of providing motivation for learning are chosen as the subject area. The objective of the research is to show the possibilities and spheres of AI use in foreign language teaching on the basis of analysing the information presented in the public domain about the existing ways of artificial intelligence application in foreign language teaching, as well as the conducted survey of nuclear engineering students. The methods used in the paper were theoretical analysis of scientific literature, analysis of periodicals, analysis of the practical use of AI in the work of teachers of the Department of Foreign Languages, as well as the data of the survey conducted among the students of technical specialties of VETI MPhI. The main result of the research is the conclusion that the use of AI allows to diversify didactic material, provide motivation of students to master technical English and understand technological processes through the use of video content.

Keywords: Artificial intelligence, technical English, didactic material, motivation, listening, video, information channels, technological processes, visualization.

Введение

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью студентам-ядерщикам владеть техническим английским на уровне Intermediate, развитием технологий искусственного интеллекта (ИИ), а также внедрением этих технологий в сферу образования. Технический английский – довольно сложный предмет для преподавания. Зачастую трудно разнообразить содержание преподаваемого материала. Приходится искать много вариантов, как вызвать интерес студентов к предмету и удержать их внимание в течение всего занятия. Создание разнообразных, интересных и аутентичных заданий требует много времени и сил от преподавателя, и здесь на помощь приходит ИИ. Общеизвестно, что ИИ проникает во все сферы нашей жизни, благодаря стремительному развитию технологий сегодня создается все больше инструментов и приложений, упрощающих нашу повседневную коммуникацию – как устную, так и письменную. Эти тенденции не могли не коснуться и преподавания иностранного языка.

Материалы и методы

Согласно толковому словарю по искусственному интеллекту, ИИ представляет собой «научное направление, в рамках которого ставятся и решаются задачи аппаратного или программного моделирования тех видов человеческой деятельности, которые тради-

ционно считаются интеллектуальными»¹. Изучение современных онлайн инструментов привело к выводу, что преподаватели иностранного языка могут использовать искусственный интеллект для обучения техническому английскому языку различными способами:

1. Интерактивные чат-боты: использование чат-ботов на базе ИИ, таких как GPT от OpenAI, Replika, Mondly может помочь студентам практиковать технический английский в реальном времени. Студенты могут задавать вопросы, вести диалоги и получать мгновенные ответы, что способствует развитию навыков общения. [1]

2. Адаптивное обучение: ИИ может анализировать уровень знаний студента и предлагать персонализированные учебные материалы, такие как статьи, видео и интерактивные задания, которые соответствуют их уровню владения техническим английским. Адаптивное обучение иностранному языку становится все более популярным благодаря использованию ИИ, который позволяет создавать персонализированный учебный план для каждого студента. Вот несколько платформ, которые предлагают такие возможности:

¹ Аверкин А.Н., Гаазе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. Толковый словарь по искусственному интеллекту. – Режим доступа: <https://www.raai.org/pages/UGFnZVR5cGU6MTAwMw==#L208> (дата обращения: 26.04.2024).

1) Duolingo – платформа, которая адаптирует учебные материалы в зависимости от успехов и предпочтений пользователя;

2) Babbel – предлагает индивидуальные уроки, основанные на уровне знаний и интересах студента;

3) Busuu – предоставляет персонализированные планы обучения и возможность практиковать язык с носителями.

Эти платформы используют различные методы адаптивного обучения, включая анализ прогресса студентов и предоставление материалов, соответствующих их текущему уровню владения языком. Они предлагают широкий спектр языков и уровней сложности, что делает их подходящими для широкого круга учащихся².

3. Иммерсивные виртуальные среды: создание виртуальных реальностей или симуляций, где студенты могут погрузиться в технические сценарии и практиковать язык в контексте, например, виртуальные лаборатории или инженерные проекты. К примеру, RosettaStone – использует иммерсивный метод обучения, который адаптируется под пользователя и его способность усваивать новый материал.

4. Интеллектуальный контент: например, такой ресурс как Twee, образовательная платформа с искусственным интеллектом, может помочь создавать и адаптировать учебные материалы, упрощая сложные технические тексты до уровня, который студенты могут легко понять и использовать для изучения. Fetchy – это генеративная платформа на базе искусственного интеллекта, разработанная специально для преподавателей. Она позволяет преподавателям создавать увлекательные задания, информационные бюллетени и многое другое.

5. Грамматические и стилистические корректоры: вот несколько примеров грамматических и стилистических корректоров, кото-

рые используют ИИ для улучшения письменного языка:

1) Grammarly: Использует продвинутые алгоритмы ИИ для проверки грамматики, пунктуации и стиля текста, предлагая рекомендации по улучшению;

2) HemingwayEditor: Помогает сделать ваше письмо более ясным и сильным, выявляя сложные предложения и предлагая более простые альтернативы;

3) ProWritingAid: Обеспечивает глубокий анализ текста и предлагает улучшения по грамматике, стилю и читаемости;

4) Ginger: Предлагает коррекцию грамматических ошибок и улучшение стиля письма на нескольких языках;

5) LanguageTool: Многоязычный корректор, который проверяет грамматику, стиль и орфографию в текстах на разных языках.

Использование инструментов на базе ИИ для проверки и коррекции грамматики и стиля в письменных работах студентов помогает им улучшать техническую точность их английского языка.

6. Игровые элементы: включение игровых элементов и соревнований с использованием ИИ может сделать процесс обучения более увлекательным и мотивирующим для студентов. Такие приложения и платформы как Quizlet, Взнания, Quizizz, Baamboozle, Wordwall - инструменты для создания карточек и игр, которые могут быть использованы для изучения новой лексики и грамматических структур. Преподаватели могут создавать собственные наборы карточек или использовать готовые коллекции. Эти приложения дают возможность в пару кликов превратить материал в увлекательную игру, в конце учащиеся получают обратную связь с количеством правильных и неправильных ответов. Преподавателю требуется лишь ввести лексические единицы, далее приложение создает несколько видов упражнений.

В данной статье были применены различные методы исследования для анализа использования искусственного интеллекта в образовательном процессе. Основным методом стал теоретический анализ научных работ, который позволил оценить текущее состояние и перспективы развития ИИ в обла-

² Адаптивное обучение в вузе: что это такое, методы, этапы, платформы. – Режим доступа: <https://zaochnik.ru/blog/adaptivnoe-obuchenie-v-vuze-chto-eto-takoe-metody-etapy-platformy/> (дата обращения: 05.06.2024).

сти образования. Дополнительно был проведен анализ периодических изданий, что дало возможность углубиться в актуальные темы и обсуждения в научном сообществе. Для получения более полной картины был проведен опрос среди студентов технических специальностей ВИТИ НИЯУ МИФИ. Результаты опроса отразили отношение студентов к использованию видеоряда при обучении аудированию.

Таким образом, сочетание теоретического анализа, изучения периодики, практического исследования и данных опроса позволило сформировать комплексное видение роли ИИ. Как видно, ИИ имеет огромный потенциал для использования при преподавании технического английского. Не все инструменты используются в настоящее время. Для этого нужно время, необходимо обучать преподавателей пользоваться современными инструментами. В данной работе предлагается опыт использования ИИ для создания дидактических материалов для преподавания профессионального и технического английского языка.

Результаты и их обсуждение

При преподавании иностранного языка основными направлениями являются обучение говорению, чтению, письменной речи, аудированию. Нейросети способны быстро сгенерировать все необходимые виды заданий для развития этих навыков. Преподаватели кафедр иностранных языков пользуются такими приложениями и платформами как Quizlet, Взнания, Quizizz, Baamboozle, Wordwall, LearningApps и др. Принцип работы этих инструментов похож: вводится изучаемая лексика, создаются карточки и игры, которые могут быть использованы при изучении нового материала. Эти приложения дают возможность в пару кликов превратить материал в увлекательную игру, в конце учащиеся получают обратную связь с количеством правильных и неправильных ответов. Преподавателю требуется лишь ввести лексические единицы, далее приложение создает несколько видов упражнений. Преимущество этих сервисов в наличии огромных библиотек готовых упражнений, а также шаблонов для создания собственных интер-

активных заданий-тестов, пазлов, кроссвордов. Можно делать игры в духе «Кто хочет стать миллионером?», упражнения вида «Заполните пропуски», «Расставьте по порядку» и другие задания.

Особо нужно отметить сервис Взнания – это российский конструктор для создания интерактивных материалов к онлайн или офлайн урокам, который во многом не уступает, а часто и превосходит аналогичные сервисы: Quizizz, Kahoot, Triventy, Socrative, Quizlet и ряд других. Функционал Взнания настолько универсален, что позволяет преподавателю сопровождать учащегося на всех этапах усвоения учебной информации: от заучивания терминов, основных понятий, закрепления знаний с помощью интерактивных упражнений, интерактивного видео до итогового тестирования учащихся.

Преподаватели кафедры иностранных языков уже в течение года используют в работе функционал инновационной онлайн-платформы, разработанной специально для преподавателей английского языка Twee, обеспечивая им все необходимые инструменты и ресурсы для эффективного преподавания. Основные инструменты для создания заданий по английскому языку: reading, listening, writing, grammar, speaking, vocabulary. Каждый из инструментов имеет несколько вариантов упражнений (рис. 1), что позволяет разнообразить дидактический материал к занятиям по техническому английскому.

Twee предлагает ряд функций, которые экономят время и делают занятия более интересными и персонализированными. Вот некоторые из его возможностей: создание вопросов для любого видео на YouTube всего за несколько секунд; генерация диалогов, историй, писем или статей на любую тему и для любого уровня; быстрое создание вопросов с выбором ответа, открытых вопросов и утверждений «Истина/Ложь»; поиск интересных вопросов для обсуждения, фактов и цитат известных людей, связанных с темой; мозговой штурм по словарному запасу, связанному с темой, и создание упражнений на заполнение пробелов и открытие скобок и многое другое.

Надо отметить, что год назад, когда только появился Twee, была возможность делать задания только для General English для уровня A2, но преподаватели уже тогда пытались делать задания для технического английского. Результат не всегда соответствовал ожиданиям, нужна была правка текста и заданий, но, тем не менее, это помогало разнообразить виды деятельности на занятиях и было технологической опорой. Теперь Twee гораздо лучше справляется с формированием заданий и значительно облегчает труд

преподавателя, а также дает возможность разнообразить дидактический материал при подготовке к занятиям. Преподаватели, которые уже использовали Twee, отмечают, что он позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на планирование уроков, и помогает создавать интересные и соответствующие уровню учеников материалы. Twee работает с неограниченным количеством тем и уровней, что делает его универсальным инструментом для любых учебных сценариев.

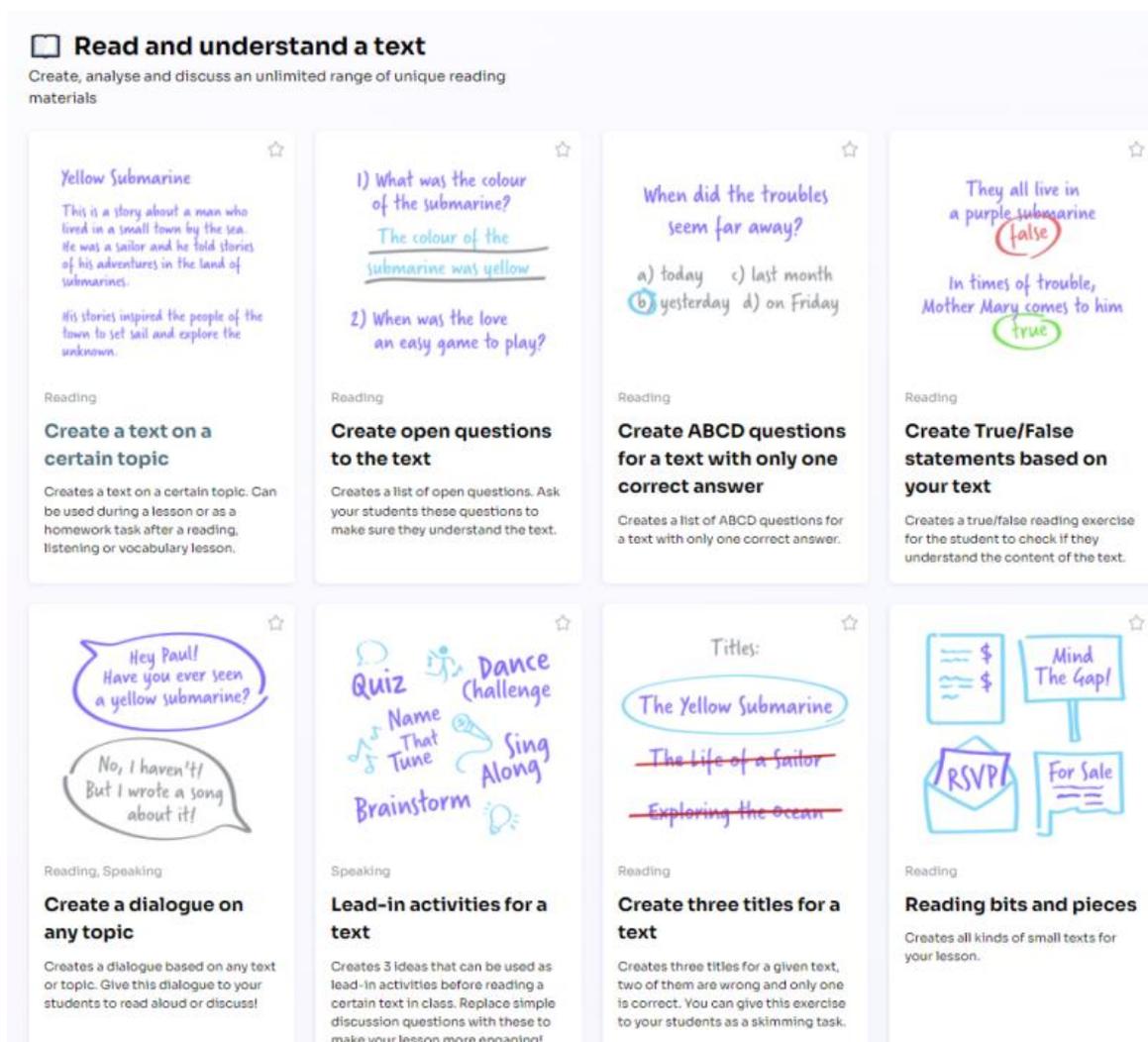


Рисунок 1. Виды инструментов и упражнений ¹

Figure 1. Types of tools and exercises ³

¹ Twee: Настройте свои уроки с помощью искусственного интеллекта. Платформа Twee (при переходе требуется регистрация). – Режим доступа: <https://app.twee.com> (дата обращения: 05.06.2024)

Еще одним инструментом ИИ является создание субтитров. Он часто используется и полезен как в преподавании, так и в повседневной жизни. Технология распознавания речи и обработки естественного языка, положенная в основу создания субтитров на сайтах видеохостинга YouTube позволяет значительно повысить доступность видеоконтента разных стран для изучающих иностранный язык. Изначально субтитры к видео были разработаны для людей с нарушением слуха. Сегодня же автоматический перевод видео на иностранном языке может быть полезным для изучающих иностранный язык. В преподавании иностранного языка этот инструмент может быть использован для оказания дополнительной поддержки в понимании видео с уровнем языка выше среднего, точного понимания видео научно-технической направленности, а также для помощи и поддержки студентов с трудностями в достижении продвинутого уровня знания иностранного языка.

Аудирование является важным элементом в обучении иностранному языку, включающим в себя восприятие, распознавание и понимание речи. Развитие навыков аудирования учитывает механизмы восприятия и стратегии аудирования. В рамках обучения аудированию особенно привлекательна функция преобразования любого видео с YouTube в текст, а потом возможность составить множество разнообразных упражнений. Например, Tweep воспроизводит текст в письменной форме из любого видео на YouTube всего за несколько секунд. Далее, на основании распознанного текста, создается ряд заданий на понимание просмотренного контента. Платформы VЗнания, iSL Collective имеют конструкторы, которые позволяют создавать учебное интерактивное видео. Причем на платформе VЗнания вы можете вставить ссылку не только с видеохостинга YouTube, но и из облачного хранилища Google Drive. После загрузки видео вы можете начать добавлять любое количество типов заданий, таких как заполнение пробела, соответствие, множественный выбор, открытый вопрос и другие. Кроме того, аутентичный видеоконтент способствует

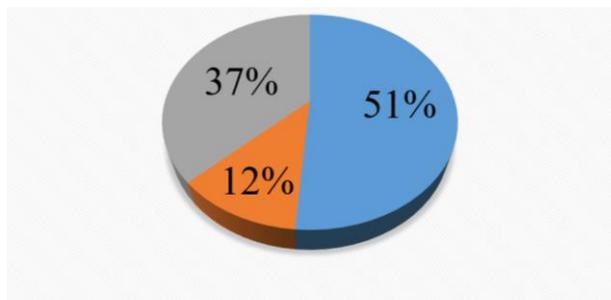
мотивации современных студентов изучать дисциплину «Технический английский».

Мышление современного студента отличается фрагментарностью, кратковременным фокусом внимания и предпочтением развлекательного контента. Оно формируется под влиянием мультимедийных и информационных технологий и может приводить к нарушению причинно-следственных связей. Для обучения аудированию очень помогает визуализация. Данные в виде изображения улучшают понимание и восприятие информации, а также понимание технологических процессов. Использование визуализации в обучении способствует активизации учебной деятельности и улучшению усвоения материала. [2] Чтобы выявить, насколько важно использовать видео на занятиях английского языка, авторами было проведено исследование, в котором студенты оценили эффективность использования видеозадания и видеоряда.

Эмпирической базой исследования послужили данные опроса, проведенного среди студентов технических направлений подготовки ВИТИ НИЯУ МИФИ. В исследовании приняли участие 185 студентов-атомщиков, изучающих дисциплины «Основы профессиональной коммуникации на английском языке» и «Технический английский для инженеров». Для проведения исследования в качестве методики использовался письменный опрос – анкета, которая включала в себя ряд вопросов, ответы на которые позволили выявить, насколько студенты заинтересованы в визуализации технологических процессов, рассматриваемых при изучении технического английского.

Выяснилось, что 51,3% студентов предпочитают видеозадания, 37% предпочитают аудио. Индифферентными остаются около 12% студентов (рис. 2). Как видно, большинство студентов склоняются к визуальному обучению, предпочитая видеозадания. Это может быть связано с тем, что видео позволяет увидеть и услышать информацию одновременно, что улучшает запоминание. Аудиозадания также популярны, но в меньшей степени. Интересно, что довольно маленькая часть студентов не имеет предпо-

чтений. Это может указывать на то, что для них подходит любой тип заданий.

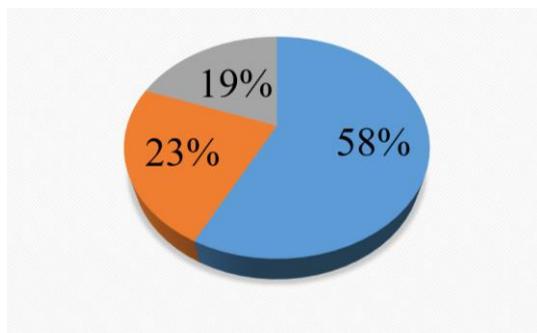


■ видео ■ аудио ■ без разницы

Рисунок 2. Ответ студентов на вопрос о предпочтении аудио или видео задания [по исследованию авторов]

Figure 2. Students' response to the question regarding preference for audio or video assignments [author's]

Ни для кого не секрет, что аудирование является не самым любимым видом деятельности в изучении английского языка. В результате анкетирования выяснилось, как студенты относятся к тому, чтобы добавить видеоряд при прослушивании аудио (рис. 3).



■ Да ■ Нет ■ Без разницы

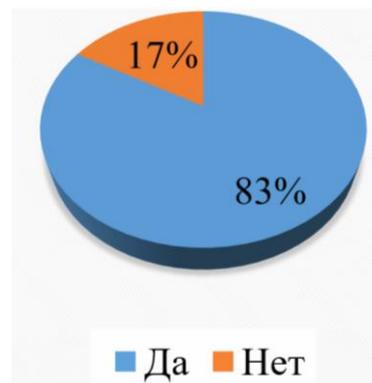
Рисунок 3. Ответ студентов на вопрос о потребности в видеоряде при прослушивании аудио [по исследованию авторов]

Figure 3. Students' response to the question regarding the need for video sequences when listening to audio. [author's]

Результаты анкетирования показывают, что большинство студентов (58%) предпочитают добавление видеоряда к аудиоматериалам. Это может быть связано с тем, что визуальные образы помогают лучше усваивать и запоминать информацию. 23% студентов удовлетворены простым аудировани-

ем, что может указывать на их способность концентрироваться на звуковой информации без визуальных подсказок. Наконец, 19% студентов не испытывают явных предпочтений, что может говорить об их гибкости в выборе учебных материалов или о том, что они могут адаптироваться к различным форматам обучения.

Насколько важным считают студенты видеозадания в процессе изучения языка позволяет судить следующий результат (рис. 4): 83% опрошенных определяют видеозадания важным элементом в процессе изучения языка. Это подчеркивает значимость визуального контента в образовательном процессе, особенно когда речь идет о языковом обучении.



■ Да ■ Нет

Рисунок 4. Ответ студентов на вопрос о важности видеозадания в процессе изучения языка [по исследованию авторов]

Figure 4. Students' response to the question regarding the significance of video assignments in language learning. [author's]

Видеоматериалы могут облегчать понимание контекста, невербальных сигналов и культурных аспектов языка, что, безусловно, способствует более глубокому усвоению материала.

Полученные данные необходимо учитывать при разработке учебных материалов, чтобы максимально эффективно обучать студентов языку. Важно учитывать доминирующие каналы восприятия и предпочтения обучающихся, что позволит в течение всего занятия поддерживать мотивацию и внимание и будет способствовать более глубокому усвоению предмета, обеспечивая дальнейшее развитие языковой, речевой или социокультурной компетенций студентов-

ядерщиков с учетом их реальных возможностей иноязычного общения.

Заключение

В современной образовательной парадигме студенты демонстрируют многомерное мышление и развитое визуальное восприятие. Пребывание в постоянном доступе к цифровым технологиям и социальным сетям формирует у них склонность к образовательным проектам, ориентированным на практическое применение знаний и интерактивное взаимодействие. Искусственный интеллект обладает потенциалом помочь преподавателю в трансформации учебного про-

цесса, делая его более динамичным, адаптированным к индивидуальным особенностям учащихся и повышая его общую эффективность.

Большим преимуществом для многих преподавателей является возможность с помощью ИИ создавать собственные образовательные решения, позволяющие не только сделать процесс изучения новых материалов интерактивным, но и сэкономить значительную часть времени. Использование ИИ не только повышает эффективность обучения, но и делает его более интерактивным и персонализированным для каждого студента

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агальцова Д.В., Валькова Ю.Е. Технологии искусственного интеллекта для преподавателя вуза. *Мир науки, культуры, образования*. 2023;2(99):5–7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=53698502> (дата обращения: 27.04.2024)

Agaltsova D.V., Valkova Yu.E. Artificial intelligence technologies for university teachers. The world of science, culture, and education. 2023;2(99):5–7. Available at: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=53698502> (accessed: 27.04.2024).

2. Землинская Т.Е., Ферсман Н.Г. Методики вузовского обучения в контексте клипового мышления современного студента. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Гуманитарные и общественные науки*. 2016;4(255):153–160. Режим доступа: https://human.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2016/4/zemlinskaya_fersman.pdf (дата обращения: 27.04.2024)

Zemlinskaya T.Ye., Fersman N.G. Teaching methods and techniques in the context of teaching students with clip thinking cognitive style. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Humanities and Social Sciences*. 2016;4(255):153–160. Available at: https://human.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2016/4/zemlinskaya_fersman.pdf (accessed: 27.04.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Зарочинцева И.В. – концепция и качественная разработка исследования;

Лупиногина Ю.А. – изучение тематического материала, систематизация информации;

Захарова Л.В. – концепция и написание текста статьи;

Кикинчук О.А. – разработка методической части исследований.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Zarochintseva I.V. – concept and qualitative research development;

Lupinogina Yu.A. – study of thematic material, systematization of information;

Zakharova L.V. – the concept and writing of the text of the article;

Kikinchuk O.A. – development of the methodological part of the research.

FUNDING:

No additional finding is involved in the research.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no relevant conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ирина Викторовна Зарочинцева, кандидат философских наук, доцент кафедры иностранных языков, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6412-8714>

WoS Researcher ID: M-3835-2018

e-mail: IVZarochintseva@mephi.ru

Юлия Анатольевна Лупиногина, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4327-1172>

WoS Researcher ID: M-3826-2018

e-mail: YALupinogina@mephi.ru

Любовь Васильевна Захарова, кандидат социологических наук, доцент кафедры иностранных языков, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1496-3935>

WoS Researcher ID: M-3905-2018

e-mail: LVZakharova@mephi.ru

Ольга Анатольевна Кикинчук, старший преподаватель кафедры иностранных языков, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2542-7732>

WoS Researcher ID: CAG-0140-2022

e-mail: OAKikinchuk@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Irina V. Zarochintseva, Can. Sci. (Phylos.), Assistant professor, Department of Foreign Languages, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6412-8714>

WoS Researcher ID: M-3835-2018

e-mail: IVZarochintseva@mephi.ru

Yulia A. Lupinogina, Can. Sci. (Pedag.), Assistant professor, Department of Foreign Languages, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4327-1172>

WoS Researcher ID: M-3826-2018

e-mail: YALupinogina@mephi.ru

Lyubov V. Zakharova, Can. Sci. (Sociol.), Assistant professor, Department of Foreign Languages, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1496-3935>

WoS Researcher ID: M-3905-2018

e-mail: LVZakharova@mephi.ru

Olga A. Kikinchuk, Senior Lecturer, Department of Foreign Languages, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2542-7732>

WoS Researcher ID: CAG-0140-2022

e-mail: OAKikinchuk@mephi.ru

Поступила в редакцию 08.04.2024

После доработки 07.06.2024

Принята к публикации 11.06.2024

Received 08.04.2024

Revision 07.06.2024

Accepted 11.06.2024

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 349.7

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02-10>

EDN YQQWJA

Оригинальная статья / Original paper



**Преобразование ядерного права Российской Федерации в самостоятельную
публичную комплексную отрасль права как способ укрепления
глобальной ядерной безопасности в мире**

В.Т. Корниенко ✉, **О.А. Макеева**, **Е.А. Брагина**

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального Исследовательского
Ядерного Университета МИФИ, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация*

✉ kvt@bk.ru

Аннотация. Данная статья посвящена обсуждению процесса преобразования ядерного права Российской Федерации в самостоятельную публичную комплексную отрасль права и его важной роли в повышении глобальной ядерной безопасности. Поскольку общеизвестно, что в качестве критериев разграничения отраслей права обычно выступают предмет и метод правового регулирования, а также наличие собственной кодификации, авторы уверены в такой необходимости. Результаты анализа деятельности государственной корпорации «Росатом» служат основанием для предложенных тезисов и лишь подтверждают эту уверенность. Главная идея статьи заключается в утверждении необходимости изменений в структуре правовой системы России с целью повышения эффективности регулирования в области ядерной безопасности. В работе рассматривается эволюция ядерного права в России, выявляются основные принципы и нормы этой области права, а также необходимость внесения изменений для адаптации к современным вызовам и угрозам. Поддерживая свою позицию анализом текущего состояния российской ядерной отрасли и мировых стандартов в области ядерной безопасности, авторы предлагают практические шаги по укреплению правового регулирования для обеспечения безопасности в ядерной сфере. Особое внимание уделено значимости укрепления международной ядерной безопасности через модернизацию национальной ядерно-правовой системы, ее соответствие международным нормам и стандартам. В статье рассматриваются текущие вопросы, включая разработку ядерной доктрины, контроль за ядерными материалами, ответственность за нарушение международных ядерных обязательств и другие аспекты, оказывающие влияние на глобальную ядерную безопасность. Исследование представляет собой важный вклад в понимание проблем ядерного права в контексте мировой безопасности, а также обосновывает необходимость самостоятельного развития этой отрасли права для обеспечения стабильности и безопасности на мировой арене. Авторы статьи предлагают конкретные рекомендации по улучшению законодательства и практики в области ядерного права с целью укрепления глобальной ядерной безопасности.

Ключевые слова: глобальная ядерная безопасность, ядерное право России, международное ядерное право, право ядерной энергетики, ядерное медицинское право, право ядерно-оборонной промышленности, Госкорпорация «Росатом», МАГАТЭ.

Благодарность. Авторы выражают благодарность кафедре экономики и социально-гуманитарных дисциплин ВИТИ НИЯУ МИФИ за помощь в подготовке и написании работы.

Для цитирования: Корниенко В.Т., Макеева О.А., Брагина Е.А. Преобразование ядерного права Российской Федерации в самостоятельную публичную комплексную отрасль права, как один из способов

укрепления глобальной ядерной безопасности в мире. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):112–120. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-10>

For citation: Kornienko V.T., Makeeva O.A., Bragina E.A. The transformation of the nuclear law of the Russian Federation into an independent public complex branch of law as a way to strengthen global nuclear security in the world. *Global nuclear security*. 2024;14(2):112–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-10>

The transformation of the nuclear law of the Russian Federation into an independent public complex branch of law as a way to strengthen global nuclear security in the world

Valery T. Kornienko ✉, Olga A. Makeeva, Elena A. Bragina 

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*
✉ kvt@bk.ru

Annotation. This article considers the process of transformation of the Russian Federation nuclear law into an independent public complex branch of law and its important role in improving global nuclear safety. Since it is well known that the criteria of distinguishing branches of law are usually the subject and method of legal regulation as well as the existence of their own codification, the authors are confident of such a need. The results of the analysis of the state corporation Rosatom activities serve as the basis for the proposed theses and only confirm this confidence. The main idea of the article is to assert the need for changes in the Russian legal system structure in order to increase the effectiveness of regulation in the field of nuclear safety. The paper examines the evolution of nuclear law in Russia, identifies the basic principles and norms of this area of law as well as the need to make changes to adapt to modern challenges and threats. Supporting its position by analyzing the current state of the Russian nuclear industry and world standards in the field of nuclear safety, the article suggests practical steps to strengthen legal regulation to ensure safety in the nuclear field. Special attention is paid to the importance of strengthening international nuclear safety through the modernization of the national nuclear legal system, its compliance with international norms and standards. The article discusses current issues, including the development of nuclear doctrine, control of nuclear materials, responsibility for violation of international nuclear obligations and other aspects affecting global nuclear security. The study is an important contribution to understanding the problems of nuclear law in the context of global safety, and also substantiates the need for independent development of this branch of law to ensure stability and security on the world stage. The authors of the article offer specific recommendations for improving legislation and practice in the field of nuclear law in order to strengthen global nuclear safety.

Keywords: global nuclear safety, Russian nuclear law, international nuclear law, nuclear energy law, nuclear medical law, nuclear defence industry law, Rosatom State Corporation, IAEA.

Acknowledgment. The authors express their gratitude to the Department of Economics, Social and Humanitarian Disciplines VETI NRNU MEPhI for their help in preparing and writing the paper.

Введение

Система права в Российской Федерации, как и в других современных государствах, активно развивается. В рамках существующей системы права возникают новые элементы (отрасли, подотрасли, институты, субинституты), анализ особенностей которых и перспектив их дальнейшего развития представляет большой теоретический и

практический интерес. Одним из таких формирующихся элементов современного российского права можно назвать ядерное право. В РФ формирование ядерного права как самостоятельной отрасли российского права связано с развитием атомной отрасли, использованием ядерной энергии как в мирных, так и оборонных целях.

Необходимость создания ядерного права России как самостоятельной комплексной отрасли российского права анализируется ведущими учеными-юристами достаточно давно. В разное время о концепции ядерного права писали такие авторы, как например А.И. Йорыш¹, В.П. Пархитко², Р.М. Валеев³, М.Н. Лысенко [1] и др.) Следует с полной уверенностью утверждать, что ядерное законодательство России – это комплексная отрасль российского законодательства, развивающаяся в тесной взаимосвязи с гражданским, трудовым, административным, бюджетным, налоговым и другими законодательствами.

Научная новизна проведенного исследования заключается в обосновании авторами необходимости правового регулирования ядерной безопасности в условиях внешнего санкционного давления и международной напряженности. На основе разработок отечественных ученых и собственных подходов и позиций авторами формируется собственное представление о ядерном праве как о самостоятельной публичной комплексной отрасли права и о ядерном законодательстве как комплексной отрасли российского законодательства, раскрываются тенденции их дальнейшего развития. Ядерное право и ядерное законодательство в современных условиях требуют особого внимания как со стороны законодателей, так и со стороны правореализаторов и правоприменителей; их полноценное развитие позволит не только

обеспечить применение ядерных технологий в различных отраслях, но и сохранить ведущее место России в кругу крупнейших ядерных держав.

Исследование и обсуждение

В настоящее время вопрос об оформлении ядерного права в самостоятельную отрасль права как никогда актуален. Для решения вопроса о возможности выделения ядерного права в самостоятельную отрасль российского права необходимо анализировать конструкцию ядерного права с точки зрения общетеоретических подходов отрасли права к критериям разграничения отраслей. Традиционно в юридической науке отрасль права рассматривается как обособившаяся внутри системы права совокупность взаимосвязанных институтов, регулирующих относительно самостоятельную и достаточно широкую сферу общественных отношений⁴; об этом подробно писал М. Сулейманов [2]. В качестве критериев разграничения отраслей выступают предмет и метод правового регулирования (это обязательные критерии) и наличие собственной кодификации (которая является дополнительным критерием и практически может не проявляться, что характерно для ряда отраслей российского права – в частности, для финансового или экологического права).

Предмет правового регулирования – это те общественные отношения, которые регламентируются отраслью права. Таким об-

¹ Йорыш А.И. Концепция атомного права. – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2015. – 720 с. – Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/352133> (дата обращения: 15.02.2024).

² Пархитко В.П. Международное ядерное право. – Москва: Знание, 1972. – 53 с. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007318703> (дата обращения: 15.02.2024).

³ Международное право. Особенная часть : учебник для вузов / Под ред. Р.М. Валеева, Г.И. Курдюкова. – Москва: Статут, 2010. – 624 с. [537–558]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/edu/student/download_books/book/valeev_rm_kurdiukov_gi_mezhdunarodnoe_pravo (дата обращения: 15.02.2024).

⁴ См., например: Общая теория права : учебник для юридических ВУЗов / Под ред. А.С. Пиголкина. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 384 с. [182]. – Режим доступа: https://fileskachat.com/download/6185_31416475f47b0177d01051621c839deb.html (дата обращения: 15.02.2024).

Абдулаев М.И., Комаров С.А. Проблемы теории государства и права : учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с. [338]. – Режим доступа: <https://litresp.ru/chitat/ru/%D0%90/abdulaev-magomet-imranovich/problemi-teorii-gosudarstva-i-prava-uchebnik-dlya-vuzov> (дата обращения: 15.02.2024).

разом, предметом ядерного права как отрасли права выступают специфические общественные отношения, так или иначе связанные с использованием атомной энергии в мирных или военных целях.

Метод правового регулирования – это те приемы и способы, которыми отрасль права регулирует свой предмет. Традиционно метод правового регулирования представлен в двух основных разновидностях – императивный (жесткий, субординационный) и диспозитивный (мягкий, координационный). Императивное правовое регулирование характерно для публичных отраслей; диспозитивное правовое регулирование используется в отраслях частного права. Необходимо учитывать, что большинство отраслей российского права пользуются и императивным, и диспозитивным правовым регулированием, однако дозированность этих методов зависит от конкретной отрасли права. С учетом складывающейся практики правового регулирования можно утверждать, что метод ядерного права – комплексный, преимущественно императивный.

Наличие собственной кодификации как дополнительный критерий разграничения отраслей предполагает наличие у отрасли права собственного кодекса или иного крупного нормативно-правового акта. Как отмечено выше, собственная кодификация характерна далеко не для всех отраслей российского права; вопрос о создании единого кодифицированного акта, регламентирующего вопросы ядерного права, с учетом современных реалий представляется нам дискуссионным.

Основной целью ядерного законодательства, по нашему мнению, является создание такой юридической основы для осуществления экономической деятельности, связанной с использованием ядерной энергии, которая бы надлежащим образом обеспечивала защиту, как отдельных граждан, так и всей экосистемы в целом.

При анализе ядерного права как отрасли права необходимо учитывать исторические реалии. После распада Союза Советских Социалистических Республик, встав на путь капиталистического развития ещё в начале 90-х гг. прошлого столетия, Россия фактиче-

ски прошла, являющийся крайне криминальным, период первоначального накопления капитала, и вступила в следующий период - период бурного развития капитализма. То обстоятельство, что в настоящее время целый ряд мировых ядерных держав в своем экономическом развитии уже подошли к высшей стадии капитализма – империализму, а Россия, занимая 1/6 часть всей земной поверхности на Планете Земля, фактически является империей, внесло существенные изменения в международные отношения между ними. В 21 веке ядерная энергетика бурно развивается во всем мире, однако данная отрасль нуждается не только в международно-правовом регулировании, что позволяет говорить о том, что объективная необходимость в формировании ядерного права как отрасли права сегодня в России уже сложилась. Российская Федерация является лидером среди государств в ядерной энергетике и ядерно-радиационных технологиях.

Как уже отмечалось ранее [3–5], государственная корпорация «Росатом» – единственная в мире компания, владеющая всем набором ядерных компетенций, объединяет в себе более 400 организаций, в том числе единственный в мире атомный ледокольный флот. «Росатом» возводит самые современные атомные станции по стране и за её рубежом, строит технологические центры и центры науки, а также поставяет необходимую для жизни изотопную продукцию для иностранных партнеров, является участником главных мировых исследовательских проектов megascience, разрабатывает новый облик крупномасштабной ядерной генерации будущего, и все это в обстоятельствах жесткой конкуренции и ограничений на мировом рынке. Российская ядерная промышленность в 2023 г. на контрасте беспримечного санкционного воздействия продолжает совершенствоваться по обширному диапазону направлений, осваивает передовые технологии и продукты, чтобы выходить с ними на новые рынки, не давая обрести конкурентные превосходства тем, кто ради этого старается политизировать мировую индустрию атома.

Достаточно бурно развивающейся отраслью современной российской медицины, крайне нуждающейся в правовом урегулировании, является ядерная медицина. Ядерная медицина – это область медицины, которая использует радиоактивные вещества (нуклиды) для диагностики и лечения различных заболеваний. Это включает в себя такие методы, как радионуклидная диагностика (использование радиоактивных веществ для получения изображений внутренних органов) и радионуклидная терапия (лечение радиоактивными веществами опухолей и других заболеваний). Радиоактивные вещества, используемые в ядерной медицине, имеют короткий период полураспада, что позволяет им быстро разлагаться в организме и минимизировать воздействие на окружающие ткани. Это делает их отличным инструментом для точной диагностики и лечения различных состояний. Ядерная медицина играет важную роль в современной медицине, она позволяет врачам получать детальные данные о состоянии пациента и предлагать индивидуализированные методы лечения. Несмотря на свою сложность и особенности, ядерная медицина имеет высокий уровень безопасности и эффективности при правильном применении. Технологии ядерной медицины позволяют врачам получать информацию о внутренних органах и процессах в организме, которую нельзя получить другими методами. Также они могут применяться для лечения определенных заболеваний, включая опухоли. Диагностика методами ядерной медицины обычно включает введение радиоактивных лекарственных препаратов или веществ, которые обладают способностью накапливаться в определенных тканях или органах. Затем, с помощью специального оборудования (гамма-камеры, ПЭТ-сканеры и др.) регистрируются излучаемые радиоактивные частицы, что позволяет создавать изображения внутренних органов и оценивать их состояние. Одним из наиболее распространенных применений ядерной медицины является позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), которая позволяет получать трехмерные изображения функциональной активности внутренних органов. Этот метод помогает врачам

обнаруживать заболевания на ранних стадиях и оценивать эффективность лечения. В отличие от диагностики, радионуклидная терапия использует радиоактивные лекарственные препараты для лечения определенных заболеваний. Это может быть лечение опухолей, гипертиреоза и других заболеваний. Радиоактивные вещества, поступающие в организм, накапливаются в определенных тканях, где они распадаются, порождая радиацию, которая уничтожает больные клетки. Ядерная медицина является областью интенсивных исследований и развития. Новые технологии и методики позволяют рассматривать более точные и эффективные способы диагностики и лечения, что является важным прорывом в современной медицине. Вместе с тем, ядерная медицина требует соблюдения всех мер безопасности и строгих протоколов управления радиоактивными веществами. Однако, при правильном применении, эта область медицины оказывает значительное воздействие на улучшение уровня диагностики и лечения различных заболеваний.

Помимо ядерной энергетики и ядерной медицины в России быстрыми темпами развивается и ядерно-оборонная промышленность, правовому обеспечению отношений в которой наше государство также нуждается. Таким образом, в рамках отрасли ядерного права можно говорить о таких подотраслях, как: право ядерной энергетики, ядерное медицинское право, право ядерно-оборонной промышленности. Необходимо обратить внимание на то, что ядерное право, будучи сформированным в качестве самостоятельной публичной отрасли российского права, имеет все черты комплексной отрасли права. Для комплексных отраслей характерно использование механизмов правового регулирования, которые регламентированы иными отраслями права и законодательства.

В отношении ядерного права комплексность проявляется в том, что некоторые отношения, входящие в предмет правового регулирования ядерного права, регламентированы нормами иного отраслевого законодательства. В качестве таких смежных отношений можно рассматривать, например, следующие:

1. вопросы уголовной ответственности в данной сфере регламентированы Уголовным кодексом РФ⁵ (в частности, статьями 215, 220, 221);

2. вопросы заключения контрактов в сфере строительства и обслуживания объектов атомной энергетики, а также реализация исследовательских проектов регламентированы актами гражданского и антимонопольного законодательства – это, в частности:

- главы 37 и 38 Гражданского кодекса РФ⁶ (договоры подряда и договоры на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ),

- Федеральным законом от 05.04.2013 № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд»⁷;

- Федеральный закон от 26.07.2006 № 135-ФЗ «О защите конкуренции»⁸;

3. Положения об ответственности государства за вред, причиненный объектами ядерной энергетики, регламентированы актами гражданского и специализированного законодательства – это, в частности:

- статьи 16, 16.1 Гражданского кодекса РФ⁹;

⁵ Уголовный кодекс Российской Федерации от 13.06.1996 № 63-ФЗ. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_10699/ (дата обращения: 15.02.2024).

⁶ Гражданский кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 26.01.1996 № 14-ФЗ. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_9027/ (дата обращения: 15.02.2024).

⁷ Федеральным законом от 05.04.2013 № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд». – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144624/ (дата обращения: 15.02.2024).

⁸ Федеральным законом от 26.07.2006 № 135-ФЗ «О защите конкуренции». – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61763/ (дата обращения: 15.02.2024).

⁹ Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая) от 30.11.1994 № 51-ФЗ. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142/ (дата обращения: 15.02.2024).

- статьи 15, 53-60 Федерального закона от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии»¹⁰.

Сегодня совершенно очевидно, что Россия сталкивается с новыми вызовами и угрозами, такими как расширение НАТО на Восток, санкции со стороны западных стран, террористические угрозы и прочее. В такой ситуации ядерное право, как самостоятельная публичная комплексная отрасль российского права приобретает особую актуальность для обеспечения национальной безопасности страны. Ядерное оружие является основным гарантом сдерживания потенциальных противников и защиты интересов России на мировой арене.

Учитывая современные реалии и нынешнее положение России на международной арене, а также её активное сотрудничество с другими государствами в областях ядерной энергетики и ядерной медицины, в нашем законодательстве необходима отдельная отрасль Российского права, публично и комплексно регулирующая отношения в ядерно-энергетическом, ядерно-медицинском и ядерно-оборонном комплексах страны.

При этом ядерное право России должно коррелироваться с международным ядерным правом и разработками Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ)¹¹, поскольку, выйдя на уровень империализма, как высшей стадии капитализма, наряду с передовыми экономиками мира, Россия, как ядерная держава, несет равную с ними ответственность за соблюдение норм между-

¹⁰ Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии». – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8450/ (дата обращения: 15.02.2024).

¹¹ См., например: Стойбер К., Шерф А., Тонхаузер В., Кармона М.Д.Л.В. Справочник по ядерному праву. Имплементирующее законодательство. – Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2010. – 186 с. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/ru/publications/8484/spravochnik-po-yadernomu-pravu-implementiruyushchee-zakonodatelstvo> (дата обращения: 15.02.2024).

народного ядерного права и нераспространение ядерного оружия. Поддержание ядерного баланса и принципа взаимной гарантии безопасности является ключевым элементом современного международного порядка. Создание ядерного права России, как самостоятельной комплексной отрасли российского права, способствует установлению мира и стабильности в мире.

Важно отметить, что ядерное право России, как таковое, не только обеспечит национальную безопасность, но также сыграет важную роль в международной дипломатии и политике. Россия активно участвует в различных международных инициативах по ядерному разоружению, контролю над ядерными материалами и нераспространению ядерного оружия. Сотрудничество в этой области способствует созданию более безопасного мира для всех государств.

Кроме того, становление ядерного права России, как самостоятельной комплексной публичной отрасли Российского права, отражает технологический и научный прогресс в области ядерной энергетики. Россия активно развивает свою ядерную энергетику, внедряя новые технологии и улучшая безопасность ядерных станций. Это способствует уменьшению зависимости от углеводородных ископаемых и снижению выбросов углекислого газа, что важно для поддержания экологического баланса. Атомные станции российского дизайна возводятся в 12 странах, включая КНР, Турцию, Индию, Египет, Венгрию и Финляндию. К портфелю зарубежных заказов «Росатома» на ближайшие 10 лет в конце 2023 года относилось около \$140 млрд. Включая в себя 33 блока, портфель зарубежных заказов по числу

строющихся блоков явно опережает конкурентов.

С учетом бурного развития Российской экономики и кардинального изменения наших отношений с Европой, становится необходимым развивать российское ядерное право. Многие аспекты ядерной деятельности не укладываются в рамки существующего законодательства, а другие отрасли Российского права, такие, к примеру, как уголовное право недостаточны для ее регулирования. В то же время, с учетом того, что, в связи с бурным ростом ядерно-медицинского комплекса России, желающих совершать противоправные действия в сфере оборота ядерных материалов становится все больше и больше, создание ядерного права России, как самостоятельной комплексной отрасли права является неотложной задачей. Поэтому, учитывая колоссальную выгоду для экономики от развития ядерно-энергетического, ядерно-медицинского и ядерно-оборонного комплексов страны, необходимо в кратчайшие сроки создать эту новую отрасль Российского права.

Заключение

Преобразование ядерного права Российской Федерации в самостоятельную публичную комплексную отрасль права является одним из способов укрепления глобальной ядерной безопасности в мире. Отражая важность регулирования использования ядерной энергии и обеспечения безопасности атомной деятельности, развитие ядерного права России необходимо для соблюдения международных стандартов, защиты окружающей среды, обеспечения национальной безопасности и сотрудничества с другими странами в ядерной сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лысенко М.Н. Международное ядерное право - это отрасль международного права? *Московский журнал международного права*. 2016;(4):11–20. <https://doi.org/10.24833/0869-0049-2016-4-11-20> Режим доступа: (дата обращения: 16.02.2024).

Lysenko M.N. Is the International Nuclear Law a Separate Branch of International Law? *Moscow Journal of International Law*. 2016; (4): 11-20. (In Russ.) Available at: <https://doi.org/10.24833/0869-0049-2016-4-11-20> (accessed: 16.02.2024).

2. Сулейманов М. Право как система. – Москва: Статут, 2016. – 360 с. Режим доступа: https://www.consultant.ru/edu/student/download_books/book/suleymanov_m_pravo_kak_sistema/ (дата обращения: 16.02.2024).

Suleymanov M. Law as a system. – M.: Statute, 2016. – 360 p. Available at: https://www.consultant.ru/edu/student/download_books/book/suleymanov_m_pravo_kak_sistema/ (accessed: 16.02.2024).

3. Корниенко В.Т. Ядерный кодекс Российской Федерации - первый шаг к кодификации ядерного законодательства России. *Глобальная ядерная безопасность*. 2013;(1/6):87–90. Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb_16.pdf (дата обращения: 15.02.2024).

Kornienko V. T. The Nuclear Code of the Russian Federation is the first step towards codification of the nuclear legislation of Russia. *Global nuclear Safety*. 2013;(1/6): 87–90. Available at: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb_16.pdf (accessed: 15.02.2024).

4. Корниенко В.Т. Введение в ядерное право Российской Федерации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2014; (1/10): 82–86. Режим доступа: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb_numbl_10.pdf (дата обращения: 15.02.2024).

Kornienko V.T. Introduction to the nuclear law of the Russian Federation. *Global nuclear security*. 2014; (1/10): 82–86. Available at: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb_numbl_10.pdf (accessed: 15.02.2024).

5. Брагина Е.А. Проблемы и пути совершенствования терминологической системы законодательства Российской Федерации о ядерной безопасности и радиационной защите // Научная дискуссия: вопросы юриспруденции: сборник статей по материалам XVI международной заочной научно-практической конференции. Москва: Международный центр науки и образования, 2013. № 8(16). – С. 58-65. Режим доступа: <http://lawlibrary.ru/article2282209.html> (дата обращения: 16.02.2024).

Bragina E.A. Problems and ways of improving the terminological system of the legislation of the Russian Federation on nuclear safety and radiation protection // Scientific discussion: issues of jurisprudence: collection of articles based on the materials of the 16th international correspondence scientific and practical conference. Moscow: Publishing house «International Center for Science and Education», 2013. P. 58–65. Available at: <http://lawlibrary.ru/article2282209.html> (accessed: 16.02.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Корниенко В.Т. – постановка задачи, разработка методологии исследования, руководство работой, написание работы;

Макеева О.А. – разработка методологии исследования, анализ литературных источников, написание работы;

Брагина Е.А. – разработка методологии исследования, анализ литературных источников, написание работы.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kornienko V.T. – problem statement, development of research methodology, work management, writing a paper;

Makeeva O.A. – development of research methodology, analysis of literary sources, writing a paper;

Bragina E.A. – development of research methodology, analysis of literary sources, writing a paper.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources..

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

The authors declare no relevant conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Валерий Тарасович Корниенко, судья в отставке, г. Волгодонск, Ростовская обл.; кандидат юридических наук, доцент кафедры «Экономики и социально-гуманитарных дисциплин», Волгодонский

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Valery Tarasovich Kornienko, Cand. Sci. (Law), retired judge, Associate Professor, Department of Economics, Social and Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the

инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
e-mail: kvt@bk.ru

Ольга Александровна Makeeva, главный специалист юридического отдела Комитета по управлению имуществом г. Волгодонска; кандидат юридических 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: maklex2009@yandex.ru

Елена Александровна Брагина, адвокат адвокатского кабинета «Брагиной Е.А.», г. Волгодонск, Ростовская обл. Российская Федерация; преподаватель кафедры «Экономики и социально-гуманитарных дисциплин», Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4865-2476>
e-mail: advokat.bragina@mail.ru

branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
e-mail: kvt@bk.ru

Olga Alexandrovna Makeeva, Cand. Sci. (Law), chief specialist of the Legal Department, Volgodonsk Property Management Committee; Associate Professor Department of Economics, Social and Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
e-mail: maklex2009@yandex.ru

Elena Alexandrovna Bragina, lawyer of the "E.A. Bragina" law office.; lecturer, Department of Economics, Social and Humanitarian Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4865-2476>
e-mail: advokat.bragina@mail.ru

Поступила в редакцию 21.02.2024
После доработки 31.05.2024
Принята к публикации 04.06.2024

Received 21.02.2024
Revision 31.05.2024
Accepted 04.06.2024

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абдельразек А.А.	20
Бекетов В.Г.	40
Бландинский В.Ю.	5
Брагина Е.А.	112
Виннийчук К.А.	52
Волков Ю.Н.	5
Зарочинцева И.В.	103
Захарова Л.В.	103
Калютик А.А.	20
Кикинчук О.А.	103
Корниенко В.Т.	112
Кравец С.Б.	40
Красников Ю.В.	61
Кривин В.В.	31
Кузин С.А.	40
Лапин А.С.	5
Лупиногина Ю.А.	103
Макарова М.В.	91
Макеева О.А.	112
Моисеенко А.А.	52
Мохаммед А.Ф.	20
Невиница В.А.	5
Поваров В.П.	61
Поволоцкая А.А.	40
Подрезов Н.Н.	52
Правосуд С.С.	73
Савельева Н.К.	91
Салех М.М.	20
Сапельников В.М.	40
Синельщикова С.Е.	40
Созинова А.А.	91
Соколова Е.А.	20
Степанов А.М.	61
Сусакин В.А.	73
Томилин С.А.	52
Фиш С.Г.	61
Фомиченко П.А.	5
Шпицер В.Я.	31
Якубов Я.О.	73

AUTHOR INDEX

Abdelrazek A.A.	20
Beketov V.G.	40
Blandinsky V.Yu.	5
Bragina E.A.	112
Fish S.G.	61
Fomichenko P.A.	5
Kalyutik A.A.	20
Kikinchuk O.A.	103
Kornienko V.T.	112
Krasnikov Yu.V.	61
Kravets S.B.	40
Krivin V.V.	31
Kuzin S.A.	40
Lapin A.S.	5
Lupinogina Yu.A.	103
Makarova M.V.	91
Makeeva O.A.	112
Mohammed A.F.	20
Moiseenko A.A.	52
Nevinitsa V.A.	5
Podrezov N.N.	52
Povarov V.P.	61
Povolotskaya A.A.	40
Pravosud S.S.	73
Saleh M.M.	20
Sapelnikov V.M.	40
Savelyeva N.K.	91
Shpitser V.Ya.	31
Sinelshchikova S.E.	40
Sokolova E.A.	20
Sozinova A.A.	91
Stepanov A.M.	61
Susakin V.A.	73
Tomilin S.A.	52
Vinniychuk K.A.	52
Volkov Yu.N.	5
Yakubov Ya.O.	73
Zakharova L.V.	103
Zarochintseva I.V.	103

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 для 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>
Kamyshev 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).
Kamyshev A.V. Pasmanik L.A., Rovinskij V.D., Getman A.F., Guba S.V. Method for determination of residual stresses in weld metal welded joints of pipelines (versions). Patent Russia RU 2711082 C1: 15.01.2020. (In Russ.) Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115 (accessed: 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., Konstantinou 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», opi-viti@terphi.ru

Выпускающий редактор: Лобковская Надежда Ивановна, +79281883628, NILobkovskaya@terphi.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