

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Глобальная ядерная безопасность

(научно-практический журнал)

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

Том 14, № 1 (50), 2024

Журнал включен в перечень ВАК РФ (988)

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

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

Лю Дамин, профессор, Китайский институт ядерной энергетики, Китай

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Компьютерная верстка:

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

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

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

Периодичность: 4 номера в год

Учредитель и издатель: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

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

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

Выход в свет: 27.03.2024

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. 1, 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

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

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, Volgodonsk, 347360, Russian Federation
Website: <https://glonucsec.elpub.ru/jour/index>
Published on: 27.03.2024
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, № 1 (50), 2024

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Оценка влияния техногенного акустического фона на показания γ-спектрометра при регистрации спектров γ-излучения <i>А.П. Елохин, С.Е. Улин, А.И., Маджидов, А.Е. Шустов</i>	5
Производство и перенос космогенного трития в земной атмосфере в модели «PARMA» <i>С.А. Куделя, В.С. Мальшевский, Г.В. Фомин</i>	17
Радиоэкологическая обстановка на отдельных территориях Южного федерального округа <i>Д.П. Плахотня, Е.А. Бураева, В.И. Ратушный</i>	22
Разработка методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200 <i>К.Н. Проскуряков, М.С. Хвостова</i>	29

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Испаритель со стабилизацией горизонтальной плоскости воды <i>А.Н. Шилин, Л.А. Коновалова, М.А. Богале</i>	37
Методы определения внутренних повреждений силовых трансформаторов <i>И.В. Мельников, В.В. Нечитайлов, В.Г. Бекетов, И.Ю. Попова, Н.А. Снитко</i>	43
Современные подходы к определению нормируемых параметров вибрационного состояния паропроводов атомных станций <i>С.Б. Кравец, С.А. Кузин, А.Ю. Смолин</i>	52

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Методика конверсии исследовательских ядерных реакторов на этапе вывода из эксплуатации <i>Д.Ю. Байдаров, Т.В. Бойкова, Ю.О. Кочнов, Н.Н. Сафронова, И.А. Тутнов</i>	58
Об актуальности контроля остаточных напряжений и необходимости их снижения <i>В.В. Потапов, Д.А. Кузьмин, А.Ф. Гетман, А.Ю. Кузьмичевский, А.В. Камышев, Л.А. Пасманик, В.Д. Ровинский</i>	68
Исследование комбинированных вариантов размещения выгорающих поглотителей Eu и Gd в тепловыделяющих сборках реакторов ВВЭР для оптимизации процесса выгорания <i>А.С.К. Рахман, М.А. Увакин, М.М. Хоссен</i>	76
Разработка оптимального алгоритма работы механизма поворота телевизионной штанги машины перегрузочной <i>А.О. Рябов, О.Ф. Цуверкалова</i>	85
Определение минимального времени выдержки профилированных кассет на Армянской АЭС с учетом графика нагрузки <i>М.Т. Акобян, А.И. Ксенофонтов, С.А. Саргсян, Ш.Б. Умаров</i>	93

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

Вопросы разработки системы мотивации сотрудников для компаний энергетического сектора <i>В.А. Бондаренко, Н.В. Пржедецкая</i>	101
Технико-экономическое обоснование мероприятия по освоению новой технологии изготовления тонкостенных крупногабаритных днищ методом фланжирования (в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск) <i>Т.С. Попова, О.И. Карпова, А.А. Попов, А.Д. Пахоруков</i>	111
Авторский указатель номера 1 (50), 2024	122

CONTENTS

Vol. 14, No 1, 2024

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY	
Assessment of technogenic acoustic background influence on γ-spectrometer readings at registration of γ-radiation spectra	
<i>A.P. Elokhin, S.E. Ulin, A.I. Majidov, A.E. Shustov</i>	5
Production and transfer of cosmogenous tritium in the Earth atmosphere in the «PARMA» model	17
<i>S.A. Kudelya, V.S. Malyshevsky, G.V. Fomin</i>	
Radioecological situation in certain areas of the Southern Federal District	
<i>D.P. Plahotnyaya, E.A. Buraeva, V.I. Ratushnyj</i>	22
Development of methods and means to improve environmental, radiation and industrial safety of NPPs with WWER-1200	
<i>K.N. Proskuryakov, M.S. Khvostova</i>	29

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT	
Evaporator with horizontal water plane stabilization	
<i>A.N. Shilin, L.A. Konovalova, M.A. Bogale</i>	37
Methods of determining internal damage in power transformers	
<i>I.V. Melnikov, V.V. Nechitailov, V.G. Beketov, I.Yu. Popova, N.A. Snitko</i>	43
Modern approaches to determining the standardised parameters of vibration state of NPP steam pipelines	
<i>S.B. Kravets, S.A. Kuzin, A.Yu. Smolin</i>	52

OPERATION OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES	
The method of research nuclear installation conversion at the decommissioning stage	
<i>D.Yu. Baidarov, T.V. Boykova, Yu.O. Kochnov, N.N. Safronova, I.A. Tutnov</i>	58
Relevance of monitoring residual stresses and the need to reduce them	
<i>V.V. Potapov, D.A. Kuzmin, A.F. Getman, A.Yu. Kuzmichevskiy, A.V. Kamyshev, L.A. Pasmanik, V.D. Rovinskiy</i>	68
Burnable absorber element (Gd and Er) use in the WWER-type reactor to increase the refueling time	
<i>A.S.K. Rahman, M.A. Uvakin, M.M. Hossen</i>	76
Development of optimal operation algorithm for rotation mechanism of refuelling machine television rod	
<i>A.O. Ryabov, O.F. Tsuverkalova</i>	85
Determining the minimum required cooling time for profiled assemblies at the Armenian Nuclear Power Plant taking into account the load schedule	
<i>M.T. Hakobyan, A.I. Ksenofontov, S.A. Sargsyan, Sh.B. Umarov</i>	93

SAFETY CULTURE AND SOCIAL AND ECONOMIC ASPECTS OF NUCLEAR INFRASTRUCTURE AREA DEVELOPMENT	
Issues of developing an employee motivation system for energy sector	
<i>V.A. Bondarenko, N.V. Przhedetskaya</i>	101
Feasibility study of measures to master a new technology for manufacturing thin-walled large-size bottoms by flanging (in conditions of «Atommash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonsk)	
<i>T.S. Popova, O.I. Karpova, A.A. Popov, A.D. Pakharukov</i>	111

Author Index of 1, 2024	122
--------------------------------------	-----

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

УДК 534-13:539.1.074

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

EDN ADABLN


Оригинальная статья / Original paper



Оценка влияния техногенного акустического фона на показания γ-спектрометра при регистрации спектров γ-излучения

А.П. Елохин  , С.Е. Улин , А.И. Маджидов, А.Е. Шустов 

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

 elokhin@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены теоретические и экспериментальные данные, определяющие влияние акустического возмущения на показания γ-детектора (КГС) с рабочим телом (газ ксенон высокого давления), работающим в поле ионизирующего излучения. С этой целью рассматривается цепочка событий: акустическая волна падает на поверхность КГС, проходит и производит возмущение в газе, которое формирует неравномерность распределения давления в рабочей среде. Воздействие ионизирующего излучения приводит к образованию в газе положительных ионов, подвижность которых оказывается значительно ниже подвижности свободных электронов, являющихся основными носителями в КГС. Эксперименты проводились с использованием беспилотного дозиметрического комплекса БДК с носителем в виде (БПЛА типа вертолета), на который навешивают дозиметрическое оборудование, применяемое для радиационного контроля окружающей среды в условиях ее радиоактивного загрязнения. Теоретические результаты, полученные при решении волнового уравнения прохождения звуковой волны в ксеноне, заполняющем КГС, представлены в виде возмущенной плотности ксенона, в которой возникают носители заряда, обусловленные воздействием ионизирующего излучения, в распределении которых также наблюдается возмущение, вызванное воздействием акустической волны. Полученные данные позволили рассчитать радиальное распределение плотности тока в различные моменты времени периода гармонических акустических колебаний. Экспериментальные данные продемонстрировали зависимость уменьшения и уширения пика полного поглощения в измеряемых спектрах гамма-излучения в зависимости от акустической нагрузки, а также частотные характеристики акустической нагрузки и их амплитудные значения в различных режимах работы БПЛА. Результаты исследований определяют рекомендации, которые целесообразно учитывать при использовании БПЛА в качестве носителей дозиметрического оборудования при радиационном контроле окружающей среды.

Ключевые слова: беспилотный дозиметрический комплекс, акустическое воздействие, мощность дозы, гамма-спектрометр на основе ксенона высокого давления, волновое уравнение.


Для цитирования: Елохин А.П., Улин С.Е., Маджидов А.И., Шустов А.Е. Оценка влияния техногенного акустического фона на показания γ-спектрометра при регистрации спектров γ-излучения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):5–16. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-01>

For citation: Elokhin A.P., Ulin S.E., Majidov A.I., Shustov A.E. Assessment of technogenic acoustic background influence on γ-spectrometer readings at registration of γ-radiation spectra. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):5–16 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-01>

Assessment of technogenic acoustic background influence on γ-spectrometer readings at registration of γ-radiation spectra

Alexander P. Elokhin  , Sergey E. Ulin , Azizbek I. Majidov,
Alexander E. Shustov 

National Research University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

 elokhin@yandex.ru

Abstract. The paper presents theoretical and experimental data determining the effect of acoustic perturbation on the readings of a γ-detector (CGS) with a working medium (high-pressure xenon gas) operating in the field of ionizing radiation. For this purpose, a chain of events is considered: an acoustic wave falls on the surface of the CGS, passes through and produces a perturbation in the gas which forms a non-uniformity of pressure distribution in the working medium. Exposure to ionising radiation leads to the formation of positive ions in the gas, the mobility of which is much lower than the mobility of free electrons, which are the main carriers in CGS. The experiments are carried out using an unmanned dosimetric complex BDK with a carrier in the form of (helicopter-type UAV) on which dosimetric equipment used for radiation control of the environment in conditions of its radioactive contamination is attached. Theoretical results obtained by solving the wave equation of sound wave passage in xenon filling the CGS are presented in the form of xenon density. The obtained data allows us to obtain the radial distribution of the current density at different moments of the harmonic acoustic oscillation period. Experimental data demonstrated frequency characteristics of acoustic load and their ampli-

tude values in different modes of UAV operation. The results of the research determine the recommendations that should be taken into account when using UAVs as carriers of dosimetric equipment in radiation monitoring of the environment.

Keywords: unmanned dosimetric complex, acoustic impact, dose rate, high-pressure xenon gamma spectrometer, wave equation.

При использовании беспилотного дозиметрического комплекса (далее – БДК) на основе беспилотного радиоуправляемого вертолета в качестве оборудования, применяемого для оценки радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности (рис. 1) [1], было обнаружено возмущение регистрируемого γ -спектра, измеряемого γ -спектрометром, рабочим телом которого являлся газ ксенон высокого давления ($P_{Xe} = 18$ атм.) (рис. 2) [2].



Рисунок 1. БПЛА «INDELA-SKY», КБ ИНДЕЛА (Белоруссия) (1), Система «INDELAOGD-20HIR» (2), состоящая из четырех встроенных модулей (тепловизор, цветная камера, лазерный дальномер, инерциальный модуль), является базовой полезной нагрузкой для БЛА «INDELA-I.N. SKY» при решении традиционных задач разведки, наблюдения и мониторинга [1]

Figure 1. INDELA-SKY UAV, INDELA Design Bureau (Belarus) (1), INDELAOGD-20HIR system (2), consisting of four built-in modules (thermal imager, colour camera, laser range-finder, inertial module), is the basic payload for INDELA-I.N. SKY UAV for traditional reconnaissance and surveillance tasks. SKY for traditional reconnaissance, surveillance and monitoring tasks [1]

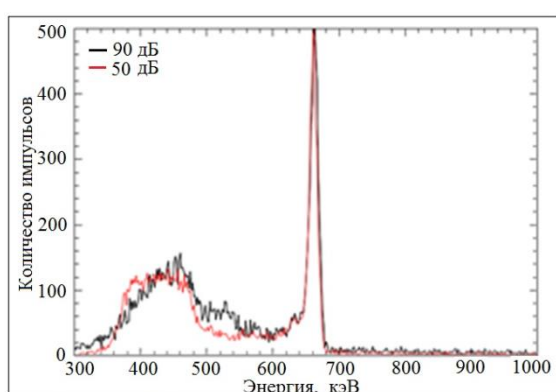


Рисунок 2. Регистрируемые спектры γ -излучения ^{137}Cs при различных акустических нагрузках [2]
Figure 2. Recorded spectra of ^{137}Cs γ -radiation at different acoustic loads [2]

Как показали исследования, возмущения создавались работой несущего пропеллера и выхлопами двигателя внутреннего сгорания. Акустические возмущения приводили к изменению емкости экранирующей сетки, располагающейся в цилиндрической

ионизационной камере (ИК) γ -спектрометра (КГС)¹ и служащей для уменьшения индукционного эффекта. Действительно, воздействие техногенного акустического фона на внешнюю поверхность детектора приводит к его встряхиванию, что и является причиной колебательного смещения сетки относительно центрального и внешнего электродов, в результате чего и происходит изменение емкости и, в конечном итоге, возникновение тока, имеющего периодический или аperiodический характер в зависимости от вида акустического возмущения (рис. 3).

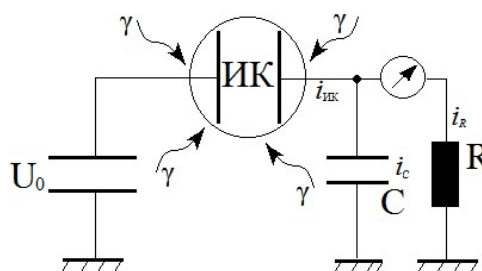


Рисунок 3. Принципиальная схема работы ИК:

U_0 – напряжение питания; $i_{\text{ИК}}$ – ток, протекающий через ИК; $i_{\text{ИР}}$ – ток нагрузки; $i_{\text{С}}$ – емкостный ток; R – сопротивление нагрузки; C – емкость монтажа и сетки [составлено авторами]

Figure 3. Circuit diagram of IR operation: U_0 is supply voltage; i_{IR} is current flowing through IR; i_{R} is load current; i_{C} is capacitive current; R is load resistance; C is mounting and grid capacitance

Система уравнений, описывающая этот процесс, в замкнутой электрической цепи (контуре) сводится к использованию первого и второго законов Кирхгофа, включая внешнее возмущение. Действительно, из первого закона Кирхгофа следует $U_0 = i_{\text{ИК}} R_{\text{вн}} + U_{\text{С}}$, ($R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление ионизационной камеры), из второго: $i_{\text{ИК}} = i_{\text{ИР}} + i_{\text{С}}$. При этом $U_{\text{С}}$ определяется как $U_{\text{С}} = \int_0^t i_{\text{С}} dt / [C_0 (1 + \alpha \times f(t))]$, где C_0 – исходная емкость; $\alpha \ll 1$ (см. рис. 2); $f(t)$ – ограниченная периодическая или аperiodическая функция воз-

¹ КГС при своей работе, в отличие от германиевых полупроводниковых детекторов, не требует низкотемпературного охлаждения, т.е. может работать в температурном диапазоне -20 — $+180$ °C; имеет более высокое разрешение по энергии γ -излучения ^{137}Cs (1,7–2%) по сравнению с кристаллом NaJ(Tl) (~12%), что обусловлено большим атомным номером ксенона $Z = 54$ и высокой плотностью газа в рабочей камере. Этот детектор; обладает высокой радиационной стойкостью по потоку нейтронов $\sim 10^{12}$ n/cm². Эффективность регистрации γ -излучения может быть существенно повышена за счет увеличения объема камеры, но это, с другой стороны, следует отнести и к его недостаткам, поскольку увеличивает размеры детектора и его вес.

мушения непрерывная вместе со своей первой производной. Использование этих уравнений состоит в том, чтобы показать, что ток i_R , который регистрируется измерительным прибором, содержит функцию возмущения и/или ее производную, таким образом доказывая, что регистрируемое возмущение зависит от колебания сетки (см. рис. 4, п. 6). Подставляя выражение для U_C в первое уравнение Кирхгофа, и, умножая обе части полученного выражения на множитель $[C_0(1+\alpha \times f(t))]$, дифференцируя его и учитывая, что $U_0 = \text{const.}$, получим выражение (1):

$$\alpha \times C_0 \times U_0 \times \frac{df}{dt} - C_0 \times R_{\text{вн}} \times \left\{ \frac{di_{\text{ик}}}{dt} [1 + \alpha \times f(t)] + \alpha \times i_{\text{ик}} \times \frac{df}{dt} \right\} = i_C \quad (1)$$

Подставляя полученное выражение во второе уравнение Кирхгофа (для токов), находим, что i_R действительно зависит от функции возмущения $f(t)$, ее производной df/dt , равно, как и от тока ионизационной камеры $i_{\text{ик}}$, а также и от его производной $di_{\text{ик}}/dt$, что и объясняет возмущение регистрируемого сигнала, выражение (2):

$$i_R = i_{\text{ик}} - i_C = i_{\text{ик}} + C_0 \times R_{\text{вн}} \times \left\{ \frac{di_{\text{ик}}}{dt} [1 + \alpha \times f(t)] + \alpha \times i_{\text{ик}} \times \frac{df}{dt} \right\} - \alpha \times C_0 \times U_0 \times \frac{df}{dt} \quad (2)$$

Однако, кроме очевидного объяснения рассматриваемого эффекта, существует и другой метод анализа, состоящий в последовательном рассмотрении ряда физических процессов, сопровождающих акустическое воздействие на ксеноновый γ -детектор (КГС) (рис. 4), в качестве которого будем рассматривать цилиндрическую ИК длиной L и радиусом R , подчиняющихся неравенству: $R \ll L$.

Это условие является стандартным и позволяет в ряде случаев пренебречь красивыми эффектами при измерении характеристик ионизирующего излучения.

Суть предлагаемого метода состоит в следующем. Падающая на внешнюю поверхность акустическая волна возбуждает колебания на цилиндрической поверхности, которые проходят в среду рабочего тела (ксенона высокого давления). При прохождении акустической волны в газе синхронно возникает изменение его плотности, а при воздействии ионизирующего излучения, в результате ионизации среды, возникает изменение плотности носителей заряда – электронов, концентрация которых и определяет ионизационный ток в камере. Таким образом задача статьи состоит в том, чтобы, во-первых, показать в чем проявляется эффект акустического возмущения, возникающий в среде рабочего тела КГС и, во-вторых, уточнить причину наблюдаемого возмущения спектров, регистрируемых газонаполненным γ -спектрометром, при пилотировании БДК: будет ли она обусловлена только механическим эффектом, обусловленным встряской приборов или физическим, связанными с прохождением звуковой волны через замкнутый металличе-

ский газонаполненный прибор, что и представляет собой ксеноновый γ -спектрометр, или тем и другим.

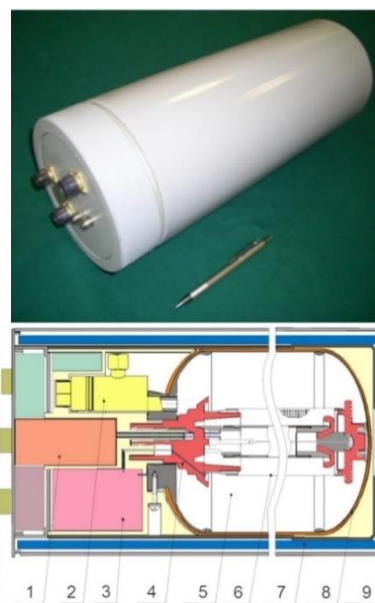


Рисунок 4. Фотография и схема КГС: 1 – зарядочувствительный усилитель; 2 – кран для заполнения камеры рабочим веществом; 3 – источник питания; 4 – керамический гермоввод; 5 – ионизационная камера; 6 – экранирующая сетка; 7 – тефлоновая изоляция; 8 – стальной корпус с композитным покрытием; 9 – внешний защитный корпус [3]

Figure 4. Photograph and scheme of CGS: 1 is charge-sensitive amplifier; 2 is a tap for filling the chamber with working substance; 3 is a power source; 4 is a ceramic grommet; 5 is an ionisation chamber; 6 is a shielding grid; 7 is Teflon insulation; 8 is a steel case with composite coating; 9 is an external protective case [3]

Собственный интерес, кроме того, представляет и математическое выражение ионизационного тока при таком возмущении. При решении задачи ограничимся только проходящей волной, пренебрегая потерями, которые могут возникать при прохождении границы раздела сред [4,5].

Рассматривая формирование ионизационного тока в камере воспользуемся результатами работы [6], в которой рассматривалась работа плоскопараллельной ИК с учетом генерации носителей заряда, которыми являлись положительные и отрицательные ионы, образующиеся при воздействии ионизирующего излучения (далее – ИИ), их рекомбинации и дрейфа, а рабочим телом являлся воздух. Учитывая геометрические особенности рассматриваемого детектора констатируем, что величина напряженности электрического поля имеет вид: $E(r) = [V_0 / \ln(R_2/R_1)]/r$, где V_0 – внешнее напряжение, а R_1, R_2 – радиусы центрального и внешнего электродов, r – текущий радиус. Особенность рабочего тела в виде газа высокого давления $^{131}\text{Xe}_{54}$, плотность которого при нормальных условиях составляет $\rho_{\text{Xe}} = 5,366$ (кг/м³), состоит в том, что поскольку ксенон относится к благородным газам, образующиеся электроны при ионизации газа не создают отрицательных ионов, в отличие от воздуха, и поэтому ионизационный ток в камере обусловлен, в

основном, электронной компонентой, а положительные ионы могут создавать ионизационный ток на уровне фона по причине того, что их подвижность в электрическом поле крайне мала по сравнению с подвижностью электронов, в силу того, что масса положительных ионов в $A \cdot m_p/m_e$ раз больше массы электронов (A – число нуклонов в атоме $^{131}\text{Xe}_{54}^{2}$). Кроме того, выбирая напряжение V_0 такой величины, при которой ионизационный ток выходит в режим насыщения, рекомбинацией носителей заряда можно пренебречь, что и позволяет записать уравнение переноса носителей заряда (электронов) в цилиндрической ионизационной камере, пренебрегая краевыми эффектами, исходя из условия $L \gg R$, с учетом указанных выше особенностей в виде выражения $G_I [\rho_{\text{Xe}}(r,t)/\rho_{\text{B}}] D'_\gamma - \mu_e \text{div}(Eq) = 0$, где G_I – радиационный выход зарядов в воздухе при нормальном давлении (1 атм.) и температуре ($T = 0^\circ\text{C}$) составляет $2,083 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см^3 при дозе в 1 Р; ρ_{Xe} – плотность ксенона в ионизационной камере при давлении P_0 атм.; ρ_{B} – плотность воздуха при нормальном давлении; D'_γ – величина мощности дозы ИИ, составляющая 10^{-4} (Р/с); μ_e – подвижность носителей заряда (электронов); E – напряженность электрического поля в цилиндрической камере; q – концентрация носителей заряда. Первое слагаемое в приведенном выше уравнении, представляет собой генерацию носителей заряда в результате ионизации газовой среды, второе – их перенос на анод в направлении электрического поля. Рекомбинацией носителей пренебрегаем в силу приведенного ранее условия: выбор величины напряжения для условия режима насыщения, при котором образующиеся носители заряда полностью создают электрический ток. Таким образом, приведенное выше уравнение представляет собой простой баланс носителей заряда. Учитывая химический состав воздуха³, для корректной оценки радиационного выхода заряда в ксеноне и характерную особенность напряженности электрического поля в цилиндрической геометрии и выражение

$$\text{div}(Eq) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(Eq)] = \frac{V_0}{r \ln(R_2/R_1)} \frac{\partial q}{\partial r},$$

получаем уравнение (3):

$$G_I (\rho_{\text{Xe}}(r,t)/\rho_{\text{B}}) [(Z/A)_{\text{Xe}}/(Z/A)_{\text{B}}] D'_\gamma - \mu_e \frac{V_0}{r \ln(R_2/R_1)} \frac{\partial q}{\partial r} = 0. \quad (3)$$

Из уравнения (3) находим радиальное распределение концентрации носителей заряда в рассматриваемой ИК (4).

$$q(r,t) = \frac{G_I D'_\gamma (Z/A)_{\text{Xe}}}{\mu_e V_0 \rho_{\text{B}} (Z/A)_{\text{B}}} \ln(R_2/R_1) \int_{R_2-R_1}^{R_2-r} \rho_{\text{Xe}}(r,t) r dr. \quad (4)$$

Плотность газа (ρ_{Xe}) в ИК при заданном давлении в P атм. находим, используя уравнение Клапейрона-Менделеева $P(r,t) = \rho_{\text{Xe}}(r,t) RT$, где $R_{\text{Xe}} = 63,33$ (Дж/кг $^\circ\text{K}$) – газовая постоянная, T – температура среды ($T = 293^\circ\text{K}$). Таким образом, плотность газа $\rho_{\text{Xe}}(r,t)$ находим, как $\rho_{\text{Xe}}(r,t) = P(r,t)/RT$. Для определения $P(r,t)$ решаем уравнение (5) [4, 5]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{1}{C_{\text{Xe}}} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где C_{Xe} – скорость звука в газе с плотностью в P_0 атм., определяемая из выражения: $C_{\text{Xe}} = \sqrt{(P_0/\rho_{\text{Xe}})k}$,

где k – показатель адиабаты ($k = 5/3$). Для решения уравнения введем безразмерные переменные r' , t' и безразмерную постоянную $C_{0\text{Xe}}$ следующим образом. Обозначим разность $(R_2 - R_1) = d$, среднюю напряженность электрического поля в ИК как

$$\bar{E}_0 = \frac{V_0}{(R_2 - R_1) \ln(R_2/R_1)} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{V_0}{d}.$$

Средняя скорость переноса электронов в электрическом поле: $v_0 = \mu \cdot \bar{E}_0 = \mu \cdot V_0/d$; обозначим через τ характерную величину времени переноса электронов со скоростью v_0 ,

$\tau = d/v_0 = d/\mu \bar{E}_0$. Если умножить и разделить левую часть уравнения на d^3/d^3 , а правую – на $(v_0^2/v_0^2) \cdot (\tau^2/\tau^2)$ и рассматривать безразмерные переменные $r' = r/d$, $t' = t/\tau$ и коэффициент $C_{0\text{Xe}}$ в виде безразмерной скорости звука в ксеноне $C_{0\text{Xe}} = C_{\text{Xe}}/v_0$,

то получим уравнение в безразмерных переменных r' , t' с безразмерной постоянной $C_{0\text{Xe}}$ при $R_1/d \leq r' \leq R_2/d$. Если вместо r' рассматривать $r'' = R_2/d - r' = R_2/d - r/d$, то при $r = R_1$, $r'' = 1$, а при $r = R_2$, $r'' = 0$. Поэтому $0 \leq r'' \leq 1$. Опуская штрихи и проводя дифференцирование в левой части уравнения (5), получаем уравнение в безразмерных переменных (6):

$$r \frac{\partial^2 P}{\partial r'^2} + \frac{\partial P}{\partial r'} - \frac{r}{C_{0\text{Xe}}} \frac{\partial^2 P}{\partial t'^2} = 0, \quad (6)$$

с граничными и начальными условиями получаем (7), (8), (9), (10):

$$P(r,t)|_{r=0} = P_0 + \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t), \quad (7)$$

$$P(r,t)|_{r=1} = P_0, \quad (8)$$

$$P(r,t)|_{r=0} = P_0 + \sum_{i=1}^N A_i, \quad (9)$$

$$\frac{\partial P(r,t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (10)$$

² Изотопы ксенона – разновидности химического элемента ксенона, имеющие разное количество нейтронов в ядре. Известны изотопы ксенона с массовыми числами от 108 до 147 ($Z = 54$, n_0 от 54 до 93). Xe стабилен для A : 126, 128 – 132, 134; для $A = 136, 124 T_{1/2} \geq 2,165 \cdot 10^{21}$ лет.

³ Химический состав воздуха: $\text{N}_2 - 78,09\%$; $\text{O}_2 - 20,95\%$; $\text{Ar} - 0,95\%$; $\text{CO}_2 - 0,03\%$. ($Z_{\text{возд.}} = 7,31$; $A_{\text{возд.}} = 14,66$).

Учитывая граничные условия, решение уравнения для $P(r, t)$ будем искать в виде двух функций, $W(r)$ и $P'(r, t)$, используя метод разделения переменных [7,8]: $P(r, t) = W(r) + P'(r, t)$. Для $W(r)$ (в размерных координатах) ставится задача (11), (12), (13):

$$\Delta W = 0, \quad (11)$$

$$W(r)|_{r=R_1} = P_0, \quad (12)$$

$$W(r)|_{r=R_2} = P_0 + \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t). \quad (13)$$

Решение задачи (11)-(13) имеет вид: $W(r) = C_1 \ln r + C_2$. Используя граничные условия (12), (13), получаем выражение:

$$W(r) = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t)}{\ln(R_2/R_1)} \ln(r/R_1) + P_0,$$

в котором вместо размерного r введем ранее принятое безразмерное обозначение $r'' = R_2/(R_2 - R_1) - r/(R_2 - R_1)$. Из последнего находим «размерное» r , в виде выражения $r = R_2 [1 - r''(1 - R_1/R_2)]$, при котором функция $\ln(r/R_1)$ принимает вид $\ln(R_2 [1 - r''(1 - R_1/R_2)]/R_1)$, причем на границах интервала $0 \leq r'' \leq 1$ при $r'' = 0$, ($r = R_2$) функция $\ln(r/R_1)$ принимает значения $\ln(R_2/R_1)$, а при $r'' = 1$ ($r = R_1$), $\ln(r/R_1) = 0$.

Таким образом, функцию $W(r)$, опуская штрихи, представляем в виде выражения (14):

$$W(r) = \left[\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) \right] \left\{ 1 + \frac{\ln[1 - r(1 - R_1/R_2)]}{\ln(R_2/R_1)} \right\} + P_0. \quad (14)$$

Для определения функции $P'(r, t)$, используя метод разделения переменных, представим эту функцию в виде произведения функций, зависящих либо от координаты r , либо от времени t : $P'(r, t) = U(r)V(t)$ и, подставляя произведение функций в уравнение (6), получим: $r \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} V + \frac{\partial U}{\partial r} V = \frac{r}{C_{0Xe}} U \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$.

Разделяя одноименные функции в виде отношений и приравнявая их к некоей постоянной $-\mu$, находим:

$$\frac{r \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial U}{\partial r}}{rU} = \frac{1}{C_{0Xe}^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\mu.$$

Откуда следует два уравнения, для которых ставятся соответствующие граничные или начальные условия:

$$r \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial U}{\partial r} + r\mu U = 0, \quad \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + C_{0Xe}^2 \mu V = 0.$$

Для функции $U(r)$ ставится задача (15), (16), (17):

$$r \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial U}{\partial r} + r\mu U = 0, \quad (15)$$

$$U(r)|_{r=1} = 0, \quad (16)$$

$$U(r)|_{r=0} = 0. \quad (17)$$

Для функции $V(t)$ аналогично получаем выражения (18), (19):

$$\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + C_{0Xe}^2 \mu V = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0. \quad (19)$$

Для начального условия $V(t)$ справедливо следующее уравнение (20):

$$P(r, t)|_{t=0} = P_0 + \sum A_i = W(r)|_{t=0} + U(r)V(t)|_{t=0}. \quad (20)$$

Решение задачи (15)-(17) представляет собой уравнение Бесселя нулевого порядка: $U(r) = B_1 J_0(r\sqrt{\mu}) + B_2 Y_0(r\sqrt{\mu})$. Учитывая свойства функций Бесселя ($J_0(0) = 1$, $Y_0(0) = -\infty$) и, требуя нетривиальности решения, используем граничные условия: из (17), находим: $B_2 = 0$, а из условия (16) следует: $B_1 \neq 0$, но $J_0(r\sqrt{\mu}) = 0$, что дает возможность определить собственные значения (далее – с.з.) функции $J_0(r\sqrt{\mu})$ [9]. Приближенные значения нулей функции Бесселя $J_0(\gamma_m) = 0$ могут быть вычислены по формуле (21) [9]:

$$\gamma_m = 2,4 + 3,13(m-1). \quad (21)$$

Тогда собственные значения функции определяются выражением $\mu_m = (\gamma_m)^2$.

При известных μ_m искомая функция $U(r)$ определится рядом по собственным функциям (далее – с.ф.), выражение (22):

$$U(r) = \sum_{m=0}^{\infty} B_m J_0(r\sqrt{\mu_m}), \quad (22)$$

где B_m – постоянные.

Решение задачи (18)-(19) представляют гармонической функцией с собственными частотами $\omega_m = C_{0Xe} \gamma_m$, возрастающими с увеличением индекса m (23):

$$V(t) = C_1 \cos(\omega_m t) + C_2 \sin(\omega_m t), \quad (23)$$

где C_1 и C_2 – постоянные.

Используя начальное условие (20), находим $V(t) = C_1 \cos(\omega_m t)$. Таким образом, функция $P'(r, t)$ может быть представлена в виде: $P'(r, t) = U(r)V(t) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0(r\sqrt{\mu_m}) \cos(\omega_m t)$, а искомая функция $P(r, t)$, в соответствии с выражением $P(r, t) = W(r) + P'(r, t)$, следующим образом (24):

$$P(r, t) = P_0 + \left[\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) \right] \left(1 + \frac{\ln[1 - r(1 - R_1/R_2)]}{\ln(R_2/R_1)} \right) + \sum_{m=1}^M B_m J_0(r\sqrt{\mu_m}) \cos(\omega_m t). \quad (24)$$

Чтобы определить коэффициенты B_m , перенесем в левую часть начального условия (20) функцию $W(r)|_{t=0}$, и, используя свойство ортогональности с.ф. с весом r , умножим обе части уравнения на произведение $rJ_0(r\sqrt{\mu_n})$ и проинтегрируем почленно с учетом того, что $\int_0^1 rJ_0(r\gamma_n)J_0(r\gamma_m)dr = 0$ при $\gamma_m \neq \gamma_n$ (25):

$$-\frac{\left[\sum_{i=1}^N A_i \right]}{\ln(R_2/R_1)} \int_0^1 r \ln[1 - r(1 - R_1/R_2)] J_0(r\gamma_n) dr = \int_0^1 r J_0(r\gamma_n) \sum_{m=1}^M B_m J_0(r\gamma_m) dr \quad (25)$$

Выражение в правой части уравнения (25) представляет собой квадрат нормы функции Бесселя нулевого порядка ($J_0(x)$) для интервала $0 \leq r \leq 1$ [10]:

$$\begin{aligned} \|J_0(x\gamma_m)\|^2 &= \frac{1}{2} \left\{ [J_0'(\gamma_m)]^2 + [J_0^2(\gamma_m)] \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ [J_1(\gamma_m)]^2 + [J_0^2(\gamma_m)] \right\} = 0,5 [J_1(\gamma_m)]^2, \end{aligned}$$

где $J_1(\gamma_m)$ – функция Бесселя первого порядка [7] и учтено, что в соответствии с определением с.з. γ_m , $J_0(\gamma_m) = 0$. Тогда коэффициенты B_m определяются выражением (26):

$$B_m = - \frac{\left[\sum_{i=1}^N A_i \right]}{\ln(R_2/R_1)} \frac{\int_0^1 r \ln[1 - r(1 - R_1/R_2)] J_0(r\gamma_m) dr}{0,5 [J_1(\gamma_m)]^2}. \quad (26)$$

Таким образом, решение задачи (6) – (10) определяется тремя слагаемыми, одно из которых представлено рядом собственных функций задачи с коэффициентами, определяемыми выражением (26). Решение ограничили пятью членами ряда ($M = 5$). Особенности решения задачи, определяющей возмущение давления $P(r, t)$ в цилиндрической ИК, при акустическом воздействии на нее, будут определяться вторым и третьим слагаемыми в формуле (24), которые играют основную роль в формировании эффектов, связанных с акустическим возмущением ИК. Действительно, если акустическое воздействие отсутствует ($\sum A_i = 0$),

то второе и третье слагаемые равны 0, а давление в камере равно не возмущенному P_0 . Но с ростом амплитуд акустического возмущения эффект воздействия будет возрастать линейно. На рис. 5 представлены результаты расчета радиального распределения давления $[P(r, t) - P_0]$ в межэлектродном промежутке КГС, заполненном ксеноном высокого давления ($P_0 = 18$ атм.), возникающего в газе при акустическом воздействии на детектор звуковой волны, представ-

ляющей собой спектр $\sum_{i=1}^5 A_i$ (цуг волн) с амплитудой каждой из его составляющих $A_i = 100$ дБ (2 Па) в момент времени $t = 0$. Расчеты проводились с использованием лицензионного пакета «PТC Mathcad Prime 3.1». На рисунке представлены: распределение от второго слагаемого (1), от третьего (2) и от их суммы (3). Согласно известному выражению $L = 20 \log(p/p_0)$ дБ, где p_0 – предел звукового давления, воспринимаемый человеком ($p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Па); $p = p_0 \cdot 10^{L/20}$ – искомое давление (Па), отвечающее измеряемому акустическому воздействию L , амплитуда звуковой нагрузки в 100 дБ составляет всего 2 Па ($1,974 \cdot 10^{-5}$ атм.). Поэтому на фоне 18 атм. давления ксенона в КГС такое возмущение трудно будет заметить, что и послужило причиной того, что на рисунке 5 радиальные распределения давления представлены каждое в отдельности, а суммарное в виде разности $P(r, t) - P_0$.

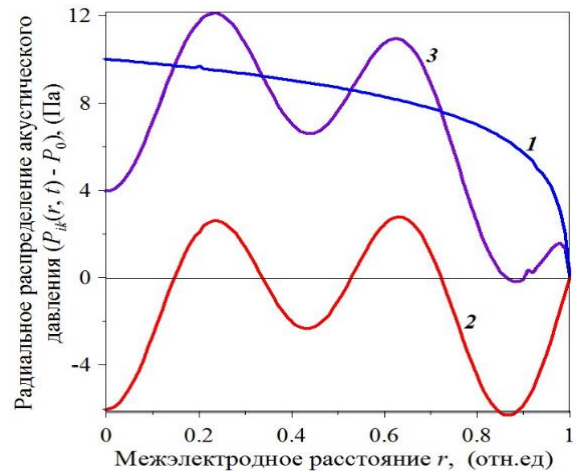


Рисунок 5. Радиальное распределение давления, возникающего в газе при воздействии на КГС цуга звуковых волн, амплитуда каждой из которых составляет 100 дБ. Расчет по формуле (24) [составлено авторами]

Figure 5. Radial distribution of the pressure arising in the gas when the CGS is exposed to a tsunami of sound waves, the amplitude of each is 100 dB. Calculation by the formula (24) [compiled by the authors]

Возвращаясь к описанию концентрации носителей заряда в ИК, ранее представленной формулой (4), используем уравнение Клапейрона-Менделеева $\rho_{Xe}(r, t) = P(r, t)/RT$ и определяем, согласно полученным выражениям для давления $P(r, t)$, плотность ксенона в камере с учетом временного возмущения, определяемым временными функциями в решении (24). Из формулы (24) также следует, что интеграл, представляющий в формуле (4) концентрацию носителей заряда $q(r, t)$, не будет влиять на функции времени, являющимися множителями $\left[\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) \right] \cdot \cos(\omega_m t)$.

Последнее означает, что плотность носителей заряда, определяющих ток в ИК, будет изменяться со временем, синхронно акустическому воздействию, т.е. на

регистрируемый сигнал будет накладываться возмущение, обусловленное акустическим воздействием.

Для оценки концентрации носителей заряда, определяемой формулой (4), величина которой требуется для вычисления плотности тока и характера его изменения в цепи ИК, необходимо верхний и нижний пределы интегрирования, а также подынтегральную переменную вместе с дифференциалом заменить на безразмерные переменные, поскольку подынтегральная функция плотности ксенона $\rho_{Xe}(r, t)$ определяется через давление в ИК $P(r, t)$, которое представлено формулой (24) в безразмерных переменных. Таким образом, размерную переменную r заменим на безразмерную u , как указывалось ранее, по формуле $u = (R_2 - r)/(R_2 - R_1)$. Тогда нижний предел ($r = R_1$) в формуле (4) становится равным 1, а верхний ($r = R_2$) – 0, а для любого r – приведенным ранее выражением. При этом переменная принимает вид:

$r = R_2[1 - u(1 - R_1/R_2)]$, а дифференциал будет равен $dr = -du(R_2 - R_1)$. Тогда, учитывая, что интервал изменения u определяется условием $0 \leq u \leq 1$, вместо выражения (4) запишем выражение (27):

$$q(r, t) = \frac{G_I D'(Z/A)_{Xe}}{\mu_e V_0 \rho_B (Z/A)_B} \cdot \frac{\ln(R_2/R_1) R_2 (R_2 - R_1)}{RT} \times \int_1^{(R_2-r)/(R_2-R_1)} P(u, t) \left[1 - u \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)\right] du, \quad (27)$$

где $P(r, t)$ представлено выражением (24), в котором переменная r безразмерна, что и позволяет формулу (4) представить в виде выражения (27), которое и определяет функцию распределения заряда $q(r, t)$ в межэлектродном промежутке ИК при акустическом воздействии. Подставляя выражение (24) в формулу (27), соответственно получаем выражение (28):

$$q(r, t) = A_0 \cdot \left\{ P_0 \cdot \int_1^{(R_2-r)/(R_2-R_1)} \left[1 - u \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)\right] du \right\} + A_0 \left\{ \left[\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) \right] \int_1^{(R_2-r)/(R_2-R_1)} \left[1 + \frac{\ln \left[1 - u \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)\right]}{\ln(R_2/R_1)}\right] \cdot \left[1 - u \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)\right] du \right\} + A_0 \left\{ \sum_{m=1}^M B_m \cos(\omega_m t) \left[\int_1^{(R_2-r)/(R_2-R_1)} J_0(u\sqrt{\mu_m}) du - \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) \int_1^{(R_2-r)/(R_2-R_1)} u J_0(u\sqrt{\mu_m}) du \right] \right\}, \quad (28)$$

$$\text{где } A_0 = \frac{G_I D'(Z/A)_{Xe}}{\mu_e V_0 \rho_B (Z/A)_B} \cdot \frac{\ln(R_2/R_1) R_2 (R_2 - R_1)}{RT}.$$

Вычисляя, находим выражение (29):

$$q(r, t) = A_0 \cdot \left\{ P_0 \left[\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1} - 1 \right) - 0,5 \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \left(\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1} \right)^2 - 1 \right) \right] \right\} + A_0 \left\{ \left[\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) \right] \frac{R_2}{2R_1} \left[\left(\frac{r}{R_2} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 + \frac{\left(\frac{r}{R_2} \right)^2 \left(\ln \left(\frac{r}{R_2} \right) - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \left(\ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) - \frac{1}{2} \right)}{\ln(R_2/R_1)} \right] \right\} + A_0 \left\{ \sum_{m=1}^M B_m \cos(\omega_m t) \frac{1}{\sqrt{\mu_m}} \left[z J_0(z) + \frac{\pi z}{2} (J_1(z) H_0(z) - J_0(z) H_1(z)) \right] \frac{\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1} \right)^{\sqrt{\mu_m}}}{\sqrt{\mu_m}} - \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{1}{\sqrt{\mu_m}} \left[z J_1(z) \right] \frac{\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1} \right)^{\sqrt{\mu_m}}}{\sqrt{\mu_m}} \right\} \quad (29)$$

где $H_0(z)$, $H_1(z)$ – функции Струве⁴, представленные в виде рядов по функциям Бесселя или численных рядов, учитывая при этом, что $J_0(\sqrt{\mu_m}) = J_0(\gamma_m) = 0$ [11].

⁴ Функции Струве

$$H_0(z) = (4/\pi) \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) / (2k+1); H_1(z) = (2/\pi) - (2/\pi) J_0(z) \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z) / (4k^2 - 1)$$

На рисунке 6 приведены радиальные распределения концентрации носителей заряда, возникающих в КГС при воздействии ионизирующего излучения и акустической нагрузки в различные моменты времени: (1, $t = 0$); (4, $t = 0,5\tau$); (5, $t = \tau$), где τ – период колебаний гармонических функции акустического воздействия), определенных выражением (29), на котором кривые (1), (4), (5) представляют результат полной суммы слагаемых в формуле (29).

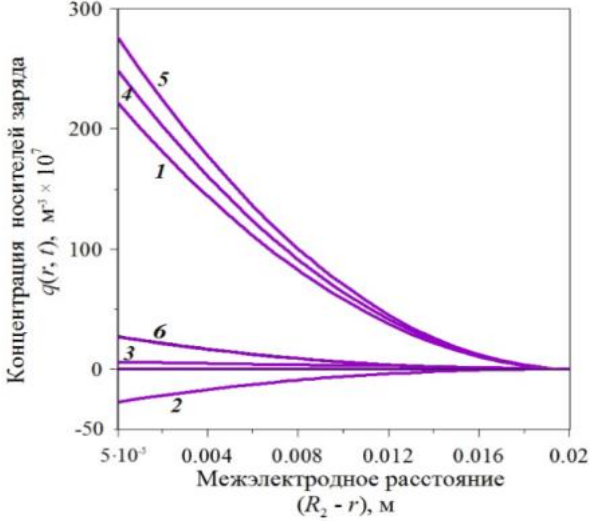


Рисунок 6. Радиальное распределение концентрации носителей заряда в КГД при воздействии ИИ и акустической нагрузки, в виде цуга звуковых волн, амплитуда каждой из которых составляет 100 дБ [составлено авторами]

Figure 6. Radial distribution of charge carriers concentration in CGD under the influence of AI and acoustic load, in the form of a tslug of sound waves, the amplitude of each of which is 100 dB [compiled by the authors]

Особенность распределения концентрации носителей заряда в соответствии с этими кривыми обусловлена воздействием ИИ и неравномерностью напряженности электрического поля, величина которого в области малых r максимальна. Кривые (2), (6) демонстрируют результат акустического воздействия, определяемого вторым слагаемым в формуле (29), при ($t = 0$), (2) и ($t = \tau$), (6). Расчеты показывают, что характер распределения этих кривых существенно

зависит от периода колебаний акустических возмущений, что приводит к изменению знака распределения, а также от их амплитуды. Изменение знака распределения соответственно приводит к увеличению/уменьшению значения концентраций зарядов, описываемых суммарной кривой (см., например, кривые (1) и (5)). Сравнивая величину полезного сигнала и сигнала, обусловленного акустическим возмущением, следует заметить, что их соотношение зависит как от плотности потока энергии (интенсивности излучения) ИИ, так и от мощности акустического воздействия, что является весьма важным при проведении экспериментов. Согласно расчетам это соотношение при заданных параметрах: $D'_\gamma = 10^{-4}$ (P/c), $\sum A_i = 10$ Па, что соответствует ~ 500 дБ, составляет $\sim 10\%$. Поэтому полностью пренебрегать возникающим негативным эффектом, связанным с акустическим возмущением не целесообразно. Решение также показывает, что при совпадении собственных частот системы ω_m с частотой возмущения ω_i и периода колебаний возможно увеличение вклада акустических возмущений в общий характер распределения. Кривая (3) представляет результат расчета третьего слагаемого в формуле (29) при $t = 0$ и, несмотря на то, что указанное выражение также содержит гармонические функции ($\cos(\omega_m t)$), обусловленные собственными колебаниями системы, кривая (3) в указанные промежутки времени не изменяет своего характера, поскольку частоты ω_m не совпадают с частотами ω_i акустических воздействий. Кроме того, вклад третьего слагаемого в суммарное распределение невелик, что непосредственно следует из рисунка 6.

Представляет интерес также рассмотреть выражение полной плотности тока, регистрируемого измерительными приборами, величина которого даст наглядную оценку эффекту воздействия акустической нагрузки на ИК и, в частности, на КГС, располагающемуся в поле ионизирующего излучения. Для этого необходимо найти среднюю (по поперечной площади межэлектродного промежутка) величину плотности тока, т.е. найти среднее значение (на единицу длины) от каждого из слагаемых в формуле (29).

Интегрируя, получаем выражение (30):

$$\begin{aligned} \bar{q}(r, t) = & \frac{1}{(R_2^2 - R_1^2)} \cdot \int_{R_1}^{R_2} q(r, t) \cdot r \cdot dr = \frac{A_0 \cdot P_0}{(R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \left[\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1} - 1 \right) - 0,5 \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \left(\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1} \right)^2 - 1 \right) \right] \cdot r \cdot dr + \\ & + \frac{A_0}{(R_2^2 - R_1^2)} \cdot \left[\sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t) \right] \frac{R_2}{2R_1} \int_{R_1}^{R_2} \left[\left(\frac{r}{R_2} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 + \frac{\left(\frac{r}{R_2} \right)^2 \left(\ln \left(\frac{r}{R_2} \right) - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \left(\ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right) - \frac{1}{2} \right)}{\ln(R_2/R_1)} \right] \cdot r \cdot dr + \\ & + \frac{A_0}{(R_2^2 - R_1^2)} \left\{ \int_{R_1}^{R_2} \sum_{m=1}^M B_m \cos(\omega_m t) \frac{1}{\sqrt{\mu_m}} \left[z J_0(z) + \frac{\pi z}{2} (J_1(z) H_0(z) - J_0(z) H_1(z)) \right] \frac{\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1} \right)^{\sqrt{\mu_m}}}{\sqrt{\mu_m}} - \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{1}{\sqrt{\mu_m}} \left[z J_1(z) \right] \frac{\left(\frac{R_2 - r}{R_2 - R_1} \right)^{\sqrt{\mu_m}}}{\sqrt{\mu_m}} \right\} \cdot r \cdot dr. \end{aligned} \quad (30)$$

Умножая полученное выражение на множитель $e\mu_e\bar{E}$, где e – заряд электрона (К); μ_e – подвижность электрона; \bar{q}, \bar{E} – приведенное выше среднее значение концентрации электрона и напряженность электрического поля, в конечном итоге в соответствии со знаками кривых (1), (2), (3) рисунка 6, получаем выражение для плотности тока, состоящее из трех слагаемых (31):

$$j(t) = 22 \times 10^{-9} - 41,5 \times 10^{-11} \sum_{i=1}^N \cos(\omega_i t) + \quad (31)$$

$$+ 3,84 \times 10^{-12} \sum_{m=1}^M \cos(\omega_m t), \quad (A/m^2),$$

в котором первое слагаемое обусловлено током, создаваемым ионизирующим излучением без учета акустического воздействия, второе – с акустическим воздействием, третье – связано с возмущением собственных колебаний системы. Поскольку временные функции в формуле (31) ограничены, то из полученного выражения следует, что при принятых исходных данных «модельного эксперимента» акустические колебания, которые возникают при внешнем воздействии, не могут оказывать существенного искажения результатов измерений радиационных характеристик при использовании подобного оборудования. Однако с ростом амплитуды акустического воздействия и уменьшением мощности дозы ионизирующего излучения результаты могут иметь противоположный характер, так как воздействие ИИ и акустики независимы, что также следует из формулы (29). Результаты расчета, представленные на рисунках 5 и 6, наглядно показали, что эффект воздействия акустики на показания газонаполненной ионизационной камеры или непосредственно на КГС имеет место. Однако авторов интересовал вопрос непосредственного воздействия акустики на результаты измерений γ -спектров, регистрируемых ксеноновым гамма-спектрометром, поскольку основными характеристиками результатов измерений являются: оценка энергии пика полного поглощения, его амплитуда и ширина на полувысоте, играющих основную роль в идентификации радионуклидов, загрязняющих воздушный бассейн или подстилающую поверхность в условиях радиационных аварий. Для определения этих параметров проводился специальный эксперимент, состоящий в использовании радиоуправляемого БПЛА – вертолета «Jr rpro gr260zRC heli» (1) и ксенонового гамма-спектрометра, установленного на специальной тележке (2) с защитным покрытием (от механических повреждений) из поролона (см. рис. 7). Источники ОСГИ с ^{137}Cs и/или ^{60}Co располагались вблизи КГС, создавая эффект загрязнения подстилающей поверхности, а вертолет поднимался на определенную высоту, как показано на рисунке 7, создавая акустическую нагрузку на КГС. Цель эксперимента состояла в получении спектральных характеристик, указанных образцов ОСГИ в условиях естественного фона, составляющего 40 дБ и при шумовой нагрузке 120 дБ, создаваемой работой БПЛА на высоте порядка 50 см над КГС. Результаты измерений принимались прямо-передающим устройством и по каналу Wi-Fi пере-

давались оператору, располагающемуся от места проведения эксперимента на расстоянии ~ 400 м.



Рисунок 7. Условия проведения эксперимента относительно воздействия акустической нагрузки на показания КГС при измерении спектров γ -излучения при естественном шумовом фоне, составляющем 40 дБ и акустическом воздействии 120 дБ [сделано авторами]

Figure 7. Experimental conditions regarding the impact of acoustic load on CGS readings when measuring γ -radiation spectra with a natural noise background of 40 dB and acoustic impact of 120 dB [by the authors]

Результаты эксперимента приведены на рисунках 8, 9, 10. На рисунке 8 приведен γ -спектр ^{137}Cs , измеренный в условиях естественного акустического фона 40 дБ, при котором энергетическое разрешение ^{137}Cs на линии 661,66 кэВ составляло $1,970 \pm 0,042\%$. На рисунке 9 приведены сравнительные γ -спектры ^{137}Cs в условиях естественного акустического фона 40 дБ и при акустической нагрузке, создаваемой работающим БПЛА 120 дБ. Как следует из рисунка амплитуда пика полного поглощения (2) при воздействии акустической нагрузки уменьшилась в 2,5 раза по сравнению с невозмущенной (1). Энергетическое разрешение ^{137}Cs на линии 661,66 кэВ при акустической нагрузке также существенно изменилось и при 120 дБ составило $6,969 \pm 0,181\%$, т.е. ухудшилось почти в 3 раза. Обычно такое разрешение выдает детектор на основе кристалла NaI(Tl) без шума. На рисунке 10 представлены спектры ^{137}Cs и ^{60}Co , имитирующих радиоактивное загрязнение подстилающей поверхности этими радионуклидами. Эксперимент с совокупностью этих радионуклидов также осуществлялся при уровне обычного шумового фона в 40 дБ и при акустической нагрузке в 120 дБ. Результаты эксперимента представлены в подразделе «Анализ спектральных характеристик ^{137}Cs и ^{60}Co ».

Анализ спектральных характеристик ^{137}Cs и ^{60}Co

В условиях естественного шума (40 дБ) энергетическое разрешение ^{137}Cs на линии 661,66 кэВ составляло $1,937 \pm 0,052\%$. При акустическом воздействии, обусловленном работой двигателя внутреннего сгора-

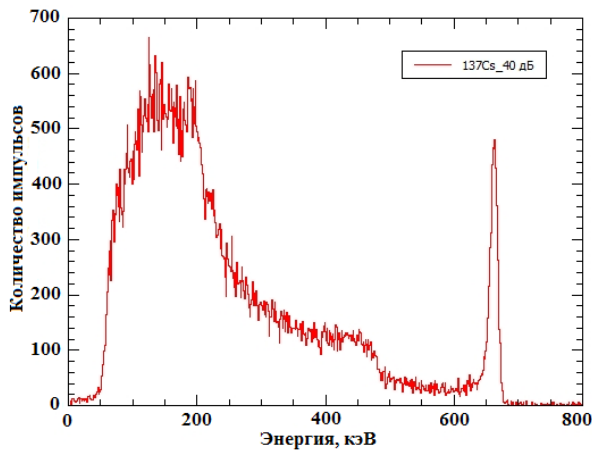


Рисунок 8. Гамма-спектр источника ^{137}Cs с монитора оператора при естественном шумовом фоне, составляющем 40 дБ [составлено авторами]

Figure 8. Gamma spectrum of the ^{137}Cs source from the operator's monitor with a natural noise background of 40 dB [compiled by the authors]

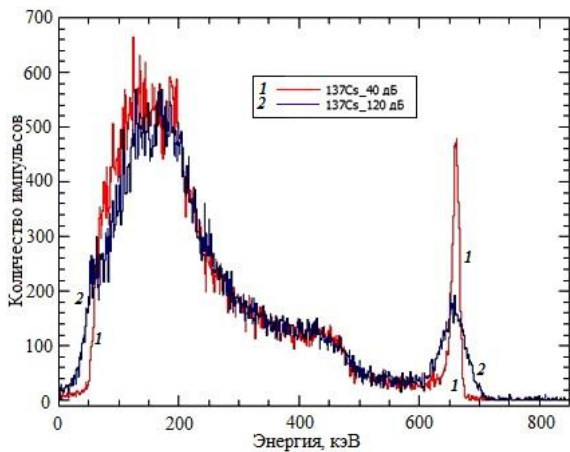


Рисунок 9. Гамма-спектр источника ^{137}Cs с монитора оператора при естественном шумовом фоне, составляющем 40 дБ (1) и акустической нагрузке в 120 дБ (2) [составлено авторами]

Figure 9. Gamma spectrum of the ^{137}Cs source from the operator's monitor with a natural noise background of 40 dB (1) and an acoustic load of 120 dB (2) [compiled by the authors]

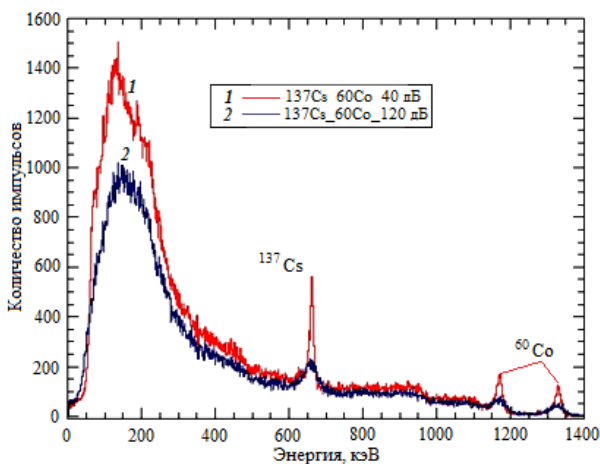


Рисунок 10. Спектры ^{137}Cs и ^{60}Co при шуме 40 дБ (1) и 120 дБ (2) [составлено авторами]

Figure 10. ^{137}Cs and ^{60}Co spectra at 40 dB noise (1) and 120 dB (2) [compiled by the authors]

ния БПЛА (120 дБ), энергетическое разрешение ^{137}Cs на линии 661,66 кэВ составляло $6,599 \pm 0,26\%$. Энергетическое разрешение ^{60}Co на линии 1332,5 кэВ в условиях естественного шума (40 дБ) составляло $1,296 \pm 0,051\%$, а при акустическом воздействии (120 дБ) на КГС на линии 1332,5 кэВ – $3,760 \pm 0,172\%$. Некоторое различие в результатах измерений энергетического разрешения, наблюдаемое в первом (только с ^{137}Cs) и во втором ($^{137}\text{Cs} + ^{60}\text{Co}$) экспериментах связано, по-видимому, со статистическим характером набора спектра, но, в любом случае результаты оказываются более, чем убедительные и в некотором смысле – весьма неожиданные.

Анализ результатов эксперимента, а также результатов расчета, представленных формулой (29) на рисунке 6, определяющих концентрацию носителей заряда (электронов) в ИК при воздействии акустической нагрузки, свидетельствуют о том, что ее воздействие приводит к перераспределению в камере концентрации носителей заряда, что, по-видимому, приводит к росту внутреннего сопротивления газовой среды в результате ее возмущения или (за счет вновь возникающего эффекта рекомбинации ионов и электронов, который также может быть обусловлен акустическим возмущением), уменьшая, таким образом, ток или концентрацию носителей заряда, участвующих в проводимости, т.е. формировании регистрируемого спектра. На это указывает уменьшение амплитуды пиков полного поглощения на рисунках 9, 10, их уширение (ухудшение энергетического разрешения) и явное уменьшение низкоэнергетической области комптоновского распределения на рисунке 10, что и подтверждает справедливость вывода, касающегося формулы (31).

Дальнейшая работа с этим «замечательным эффектом» сводится к вопросу как от него избавиться. По-видимому, самым простым методом является изоляция подобных ионизационных камер слоем вспененного полистирола, используемого для шумопоглощения, или применение в качестве БПЛА квадрокоптеров, создающих значительно меньшее акустическое возмущение, но, возможно, существуют и иные методы, обоснование и применение которых потребует дальнейших научных исследований.

Таким образом, решение задачи о возмущении показаний ИК или КГС при работе в поле ИИ в условиях воздействия внешней акустической нагрузки, показывает, что возмущения могут быть обусловлены как механическими (встряской сетки), так и физическими причинами, связанными с возбуждением колебаний в газовой среде, представляющей собой рабочее тело ИК. При этом, следует заметить, что изменение во времени тока, регистрируемого на сопротивлении нагрузки R , будет зависеть, как от функции возмущения $f(t)$, связанной с изменением емкости на сетке при ее встряске, а также с ее производной df/dt , согласно формуле (2), так и от тока ионизационной камеры $i_{\text{ик}}$ вместе со своей производной $di_{\text{ик}}/dt$, обусловленных акустическим воздействием на ИК. И если от механической (встряски сетки) можно избавиться путем использования гиросплатформы, устанавливаемой на любой подвижной носитель, то негатив-

ный эффект воздействия внешней акустической нагрузки на показания ИК или КГС, работающих в поле ИИ, может быть устранен путем использования любого доступного метода, увеличивающего шумодавление или путем использования специального программного обеспечения. В частности, в связи с развитием электронных компонентов, например, быстрых аналогово-цифровых преобразователей с

большим числом разрядов, метод цифровой обработки электрических сигналов с детекторов в режиме реального времени сегодня является крайне перспективным [12]. Подобные алгоритмы успешно применяются для различных типов гамма-спектрометров, в частности для сцинтилляционных [13] и полупроводниковых [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Родионов И.А., Елохин А.П., Рахматулин А.Б., Улин С.Е., Маджидов А.И., Шустов А.Е. Особенности передачи информации по радиоканалу в режиме реального времени при использовании беспилотного дозиметрического комплекса. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(1):5–13. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-01>
2. Улин С.Е., Дмитренко В.В., Власик К.Ф. [и др.] Гамма-спектрометрический комплекс для вывода ядерных объектов из эксплуатации. *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2020;47(6):32–40. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44557670_15135781.pdf (дата обращения 30.11.2023).
- Ulin S.E., Dmitrenko V.V., Vlasik K.F. [et al.] Gamma Spectrometry system for decommissioning nuclear facilities. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2020;47(6):176–180. <https://doi.org/10.3103/S1068335620060081>
3. Улин С.Е., Дмитренко В.В., Грачев В.М. [и др.] Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне для обнаружения и идентификации радиоактивных и делящихся материалов. *Вопросы электромеханики. Труды НИИ ВНИИЭМ*. 2010;114:43–50. Режим доступа: <https://jurnal.vniiem.ru/text/114/43.pdf> (дата обращения 30.11.2023).
- Ulin S.E., Dmitrenko V.V., Grachev V.M. [et al.] Compressed xenon gamma spectrometers for detecting and identifying radioactive and fissionable materials. *Electromechanical matters. VNIEM studies*. 2010;114:43–50. (In Russ.) Available at: <https://jurnal.vniiem.ru/text/114/43.pdf> (accessed: 30.11.2023).
4. Исакович М.А. Общая акустика. Москва: Наука, 1973. 495 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007129077> (дата обращения 21.12.2023).
- Isakovich M.A. General acoustics. Moscow: Nauka, 1973. 495 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007129077> (accessed: 21.12.2023).
5. Лепендин Л.Ф. Акустика. Москва: Высшая школа, 1978. 448 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007625501> (дата обращения 21.12.2023).
- Lependin L.F. *Acoustics*. Moscow: Vysshaya shkola, 1978. 448 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007625501> (accessed: 21.12.2023).
6. Елохин А.П., Рау Д.Ф., Ткачев А.Н., Румянцев А.Д., Беркович В.М., Хлопотин Р.С. Дозиметрическая система для определения мощности выброса газоаэрозольной радиоактивной примеси в условиях радиационных аварий. *Атомная энергия*. 2009;107(6):319–328. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1625/1605> (дата обращения 30.11.2023).
- Elokhin A.P., Khlopotin R.S., Rau D.F., Tkachev A.N., Rumyantsev A.D., Berkovich V.M. Dosimetric system for determining the emission rate of gas-aerosol radioactive impurity during a radiological accident. *Atomic Energy*. 2009;107(6):387–399. <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9241-z>
7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Москва: Наука, 1966. 724 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007725658> (дата обращения 21.12.2023).
- Tikhonov A.N., Samarsky A.A. *Equations of Mathematical Physics*. Moscow: Nauka, 1966. 724 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007725658> (accessed: 21.12.2023).
8. Арсенин В.Я. Математическая физика. Основные уравнения и специальные функции. Москва: Наука, 1966. 367 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005948961> (дата обращения 21.12.2023).
- Arsenin V.Ya. *Mathematical Physics. Basic equations and special functions*. Moscow: Nauka, 1966. 367 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005948961> (accessed: 21.12.2023).
9. Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по линейным обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Факториал, 1997. 303 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001763480> (дата обращения 21.12.2023).
- Zaitsev V.F., Polyanin A.D. *Handbook on linear ordinary differential equations*. Moscow: Factorial, 1997. 303 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001763480> (accessed: 21.12.2023).
10. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Специальные функции. Москва: Наука, 1983. 750 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001177065> (дата обращения 21.12.2023).
- Prudnikov A.P., Brychkov Y.A., Marichev O.I. *Integrals and series. Special Functions*. Moscow: Nauka, 1983. 750 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001177065> (accessed: 21.12.2023).
11. Абрамовиц М., Липман Д., Мак Ниш А. [и др.] Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. Пер. с англ. под ред. В.А. Диткина и Л.Н. Кармазиной. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. 832 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007759009> (дата обращения 21.12.2023).
- Abramowitz M., Lipman D., McNish A. [et al.] *Handbook of special functions with formulas, graphs and mathematical tables*. Edited by M. Abramowitz and I. Stegan. Translation from Engl. edited by V.A. Ditkin and L.N. Karmazina. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1979. 832 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007759009> (accessed: 21.12.2023).
12. Warburton W.K., Momayezi M., Hubbard-Nelson. B., Skulski W. Digital pulse processing: new possibilities in nuclear spectroscopy. *Applied radiation and isotopes*. 2000;53(4-5):913–920. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00247-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00247-5)

13. Boghrati B., Moussavi-Zarandi A., Esmaeili V., Nabavi N., Ghergherehchi M. On gamma-ray spectrometry pulses real time digital shaping and processing. *Instruments and experimental techniques*. 2011;54:715–721. <https://doi.org/10.1134/S0020441211050034>

14. Tada T., Hitomi K., Tanaka T., Wu Y., Kim S.-Y., Yamazaki H., Ishii K. Digital pulse processing and electronic noise analysis for improving energy resolutions in planar TlBr detectors. *Nuclear instruments and methods in physics research. Section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*. 2011;(638)1:92–95. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.02.070>

ВКЛАД АВТОРОВ:

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

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

Маджидов А.И. – постановка эксперимента и участие в проведении эксперимента;

Шустов А.Е. – проведение эксперимента.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

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

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

Majidov A.I. – setting up and participating in the conduct of the experiment;

Shustov A.E. – conducting an experiment.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

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

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

WoS ResearcherID: F-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

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

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

e-mail: seulin@gmail.com

Азизбек Истамович Маджидов, инженер, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: aimadzhidov@mephi.ru

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

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

e-mail: aeshustov@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

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

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

WoS ResearcherID: F-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

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

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

e-mail: seulin@gmail.com

Azizbek I. Majidov, Engineer, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: aimadzhidov@mephi.ru

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

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

e-mail: aeshustov@mephi.ru

Поступила в редакцию 29.12.2023

После доработки 12.02.2024

Принята к публикации 22.02.2024

Received 29.12.2023

Revision 12.02.2024

Accepted 22.02.2024

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

УДК 66.096.3 : 551.510.7

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

EDN ADHTRK


Оригинальная статья / Original paper



Производство и перенос космогенного трития в земной атмосфере
в модели «PARMA»

С.А. Куделя , В.С. Малышевский  , Г.В. Фомин 

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 vsmalyshevsky@sfedu.ru

Аннотация. Проанализирован вклад реакций (n,X) и (p,X) на ядрах азота и кислорода в производство и перенос космогенного трития в атмосфере Земли. Для расчетов потоков вторичных протонов и нейтронов в ядерно-электромагнитном каскаде использовалась аналитическая модель «PARMA». Модель основана на аналитических аппроксимациях как многочисленных экспериментальных данных, так и данных компьютерного моделирования, и позволяет вычислять потоки различных частиц вторичного космического излучения (нуклонов, мюонов, а и b-частиц) с выбором заданного энергетического диапазона, высоты атмосферы, жесткости геомагнитного обрезания, солнечной активности. Решена задача о вертикальной турбулентной диффузии трития в атмосфере Земли и получена зависимость его концентрации от высоты. Численное интегрирование уравнений переноса проведено с использованием интегро-интерполяционного метода. Дана оценка общего запаса космогенного трития в земной атмосфере, сбалансированного турбулентной диффузией, распадом и космогенным образованием, которая составила величину $\sim 1.9 \cdot 10^{17}$ Бк. Результаты расчетов показывают, что в земной атмосфере содержится не более 10% от всего космогенного трития. Полученные результаты в целом согласуются с более ранними эмпирическими и полуэмпирическими моделями, подтверждающими, что техногенный тритий на данный момент составляет большую часть от его общего запаса.

Ключевые слова: космогенные радионуклиды, тритий, радиоактивность атмосферы, турбулентная диффузия.


Для цитирования: Куделя С.А., Малышевский В.С., Фомин Г.В. Производство и перенос космогенного трития в земной атмосфере в модели «PARMA». *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):17–21. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-02>

For citation: Kudelya S.A., Malyshevsky V.S., Fomin G.V. Production and transfer of cosmogenous tritium in the Earth atmosphere in the «PARMA» model. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):17-21 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-02>

Production and transfer of cosmogenous tritium in the Earth atmosphere
in the «PARMA» model

Savely A. Kudelya , Vyacheslav S. Malyshevsky  , Georgy V. Fomin 

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 vsmalyshevsky@sfedu.ru

Abstract. The paper analyses contribution of reactions (n,X) and (p,X) on nitrogen and oxygen nuclei to the production and transfer of cosmogenic tritium in the Earth atmosphere. To calculate the fluxes of secondary protons and neutrons in the nuclear-electromagnetic cascade, the analytical model «PARMA» was used. The model is based on analytical approximations of both numerous experimental data and computer simulation data, and allows one to calculate the fluxes of various particles of secondary cosmic radiation (nucleons, muons, a- and b-particles) with the choice of a given energy range, atmospheric height, geomagnetic cutoff rigidity, solar activity. The problem of vertical turbulent diffusion of tritium in the Earth's atmosphere was solved and the dependence of its concentration on altitude was obtained. Numerical integration of the transport equations was carried out using the integro-interpolation method. An estimate of the total reserve of cosmogenic tritium in the Earth's atmosphere, balanced by turbulent diffusion, decay and cosmogenic formation, was given, which amounted to $\sim 1.9 \cdot 10^{17}$ Bq. The calculation results show that the earth's atmosphere contains no more than 10% of all cosmogenic tritium. The results are generally consistent with earlier empirical and semi-empirical models confirming that man-made tritium currently accounts for the majority of the total tritium supply.

Keywords: cosmogenic radionuclides, tritium, atmospheric radioactivity, turbulent diffusion.

Введение

Изотоп водорода тритий (${}^3\text{H}_1$ или T) в силу достаточно большого периода полураспада ($T_{1/2} = 12.3$ лет) является одним из глобальных загрязнителей атмосферы и гидросферы [1,2]. Тритий образуется в ядерно-электромагнитном каскаде в атмосфере Земли, а также в результате работы предприятий ядерно-топливного цикла и испытаний ядерного оружия в цепных реакциях деления и синтеза. В атмосфере тритий в результате окисления ($T_2 + O_2 \rightarrow T_2O$) и изотопного обмена ($T_2 + H_2O \rightarrow HTO + HT$) конвертируется в молекулы тритиевой воды (преимущественно в виде НТО) и вовлекается в нормальный земной круговорот воды и, таким образом, поступает практически во все живые организмы. Попавший в организм тритий может вызывать мутагенные изменения как за счет воздействия β -излучения (средняя энергия β -частиц 5,7 кэВ), так и изменения структуры молекул в результате замены водорода на нейтральный ${}^3\text{He}$. В атмосфере тритий перемещается вместе с парами воды в воздушных массах, участвуя в естественном круговороте воды. Моделирование образования и распределения естественного космогенного трития в атмосфере является важной задачей, опреде-

ление естественной концентрации позволит отделить из экспериментальных данных тритий из техногенных источников, в частности, определять количество трития, выброшенного в результате работы предприятий ядерного цикла. Таким образом, концентрация трития может служить маркером для целей дозиметрического контроля, анализа атмосферных процессов и исследований космических ливней. Однако, экспериментальное определение естественной концентрации затруднено глобальной загрязненностью атмосферы тритием в результате термоядерных испытаний в XX в. В этой связи определение естественного распределения трития возможно только путем моделирования образования и переноса изотопа в атмосфере.

Образование и перенос космогенного трития

Основным механизмом образования изотопа трития в верхних слоях атмосферы являются ядерные реакции на ядрах азота и кислорода ${}^{14}\text{N}_7(n,X){}^3\text{H}_1$, ${}^{16}\text{O}_8(n,X){}^3\text{H}_1$, ${}^{14}\text{N}_7(p,X){}^3\text{H}_1$, ${}^{16}\text{O}_8(p,X){}^3\text{H}_1$. Обобщенные данные по сечениям таких реакций и содержатся в базах ядерных данных, например EXFOR¹, и приведены на рисунке 1. Погрешности измерений сечений ядерных реакций, согласно данным, в разных экспериментах не превышают 30%.

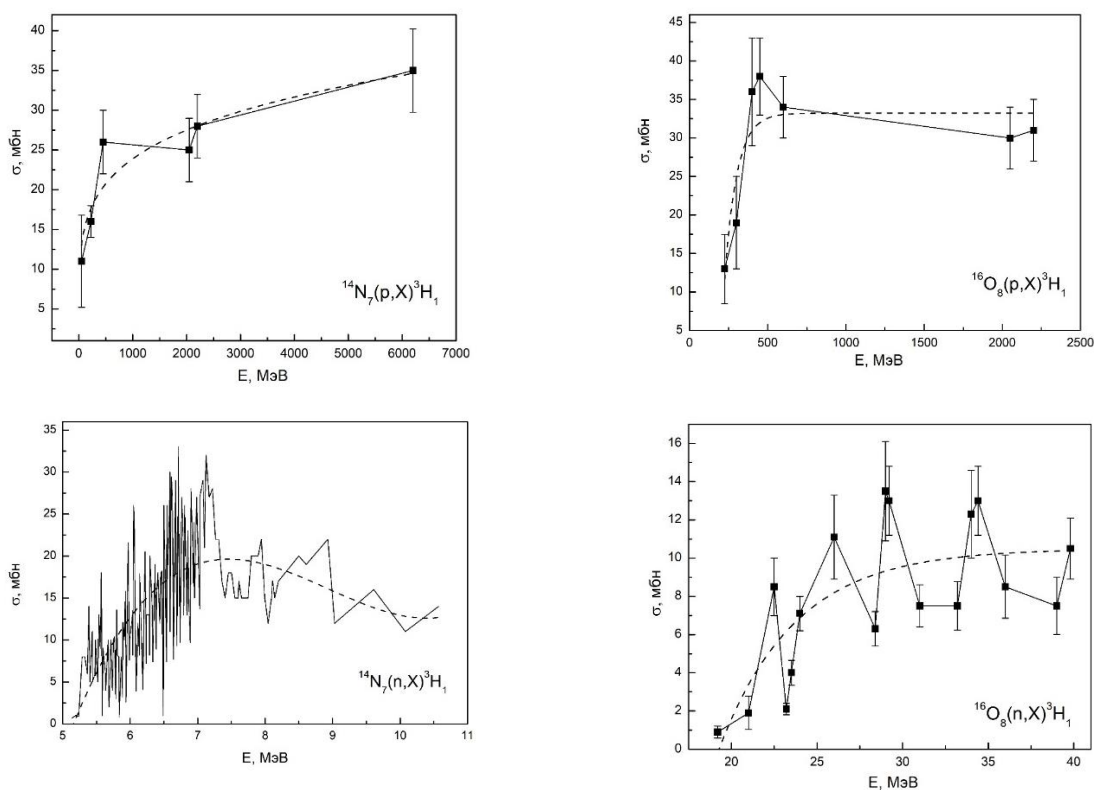


Рисунок 1. Сечения ядерных реакций, обобщенные по данным EXFOR. Пунктирной линией показана полиномиальная аппроксимация, используемая в численных расчетах¹

Figure 1. Nuclear reaction cross sections generalized from EXFOR data. The dotted line shows the polynomial approximation used in numerical calculations¹

¹ Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR). Available at: <http://cdfe.sinp.msu.ru/exfor/index.php> (accessed: 22.12.2023).

В настоящей работе расчеты плотности потока нейтронов и протонов в ядерно-электромагнитном каскаде проведены на основе эмпирических формул, которые впервые были получены авторами работ [3,4] (модель «PARMA» – PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere). Модель основана на аналитических аппроксимациях как многочисленных экспериментальных данных, так и данных компьютерного моделирования. Использование этой модели позволяет получать надежные данные по потокам нейтронов и протонов в земной атмосфере без необходимости моделирования ядерно-электромагнитных каскадов. Аналитическая модель «PARMA» позволяет вычислять потоки различных частиц вторичного космического излучения (нуклонов, мюонов, а и b-частиц) с выбором заданного энергетического диапазона, высоты атмосферы, жесткости геомагнитного обрезания, солнечной активности. Эта модель использовалась нами ранее для оценки производства космогенного бериллия в атмосфере Земли². Некоторые результаты моделирования плотности потоков нуклонов на разных широтах и на разных высотах над уровнем моря при средней солнечной активности были рассчитаны в [5] и здесь приводить не будем. В настоящей работе расчеты плотности потока нейтронов и протонов в ядерно-электромагнитном каскаде проведены на основе эмпирических формул, которые впервые были получены авторами работ [3,4] (модель «PARMA» – PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere). Эта модель использовалась нами ранее для оценки производства космогенного бериллия в атмосфере Земли [5].

Скорость образования космогенного трития на заданной высоте атмосферы определяется формулой (1) [5]:

$$P_i(h) = N_i(h) \int_{E_1}^{E_2} dE \sigma_i(E) J_i(E, h), \quad (1)$$

где $N_i(h)$ – число атомов азота (или кислорода) в одном грамме воздуха на высоте h ;

$\sigma_i(E)$ – сечение соответствующей ядерной реакции;

$J_i(E, h)$ – плотность потока нейтронов (или протонов) на высоте h .

Формула (1) дает скорость производства космогенных изотопов в одном грамме воздуха на заданной высоте атмосферы.

Интегрирование в формуле (1) проводилось от порога образования до максимального значения энергии в соответствующем канале реакции. Результаты численного интегрирования для разных каналов образо-

вания трития на средней широте при минимальной солнечной активности показаны на рисунке 2. Из результатов расчетов скорости образования трития видно, что основной вклад в производство космогенного радионуклида трития вносят реакции $N(n, X)T$ и $N(p, X)T$.

Основная масса космогенных радионуклидов образуется в верхних слоях атмосферы, и в дальнейшем их распространение в атмосфере связано с перемещением вместе с воздушными массами аэрозольного носителя изотопа.

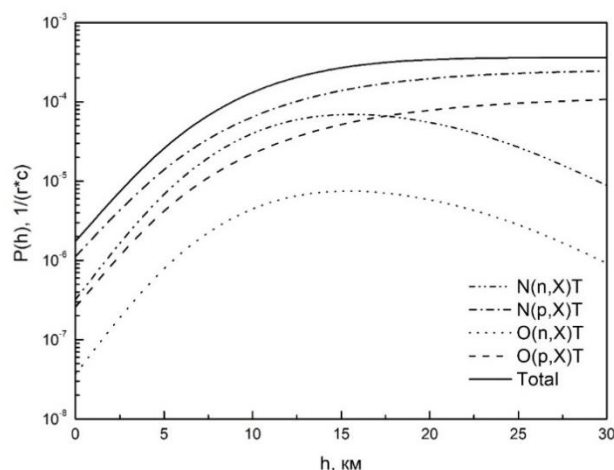


Рисунок 2. Высотная зависимость скорости образования трития в воздухе при минимальной солнечной активности на средней широте в разных каналах ядерной реакции [составлено авторами]

Figure 2. Altitude dependence of the rate of tritium formation in air at minimum solar activity at mid-latitude in different nuclear reaction channels [compiled by the authors]

Для определения концентрации трития в верхних слоях атмосферы опустим вымывание осадками, и будем считать, что удаление изотопа связано лишь с его распадом и сухим гравитационным осаждением. Тогда при пренебрежении горизонтальной диффузией стационарное уравнение вертикального переноса имеет вид выражения (2) (см., например, [6]):

$$\frac{\partial(vC)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(Kp \frac{\partial(C/p)}{\partial z} \right) - \lambda C + S = 0, \quad (2)$$

где C – концентрация трития;

K – коэффициент турбулентной диффузии;

λ – постоянная распада трития;

S – источник трития (т.е. скорость его образования);

ρ – зависящая от высоты плотность воздуха;

v – скорость гравитационного (сухого) осаждения.

Граничными условиями для данного уравнения будут следующие два предположения: первое – равновесие между радиоактивным распадом и образованием новых ядер на больших высотах ($z_{\max} \approx 30$ км). Это условие следует из выражения (2) при пренебрежении гравитационным осаждением и турбулентной диффузией на больших высотах. Влияние солнечной активности на концентрацию трития $C(z_{\max})$ при этом автоматически учитывается через скорость его обра-

² Малышевский В.С., Фомин Г.В. Программа «ParticleFluxes» // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2014. – Т. 6, № 61. – 42 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?idn=twtgdf> (дата обращения: 12.01.2024).

зования $S(z_{max})$. Второе – равенство нулю турбулентной компоненты скорости вещества на уровне Земли, выражение (3):

$$\lambda C(z_{max}) = S(z_{max}), \quad K\rho \frac{\partial(C/\rho)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0. \quad (3)$$

Коэффициент турбулентной диффузии K (m^2/c) является параметром, который, вообще говоря, необходимо оценивать путем моделирования (или измерения) вертикального распределения радионуклида в атмосфере. Обычно для этой цели используют экспериментальные данные о среднемесячных концентрациях активности в приземном слое воздуха [6]. Поскольку на сегодняшний день турбулентная диффузия не является удовлетворительно описанным явлением и принимая во внимание недавние работы по исследованию переноса космогенных радионуклидов в атмосфере Земли [6,7], значения коэффициента турбулентной диффузии K (m^2/c) определим следующим образом [7], выражение (4):

$$K(z) = \begin{cases} 0.001 \cdot z, & 0 \leq z < 1000 \text{ м} \\ 1, & 1000 \leq z < 11000 \text{ м} \\ 0.1, & z > 11000 \text{ м} \end{cases} \quad (4)$$

Его поведение с высотой связано с так называемой тропопаузой, т.е. верхней границы тропосферы на высоте примерно 11000 м, за которой значение K резко падает, так как турбулентные потоки ослабевают, а воздушные массы стратосферы и тропосферы слабо смешиваются [7]. Уравнение переноса (2) фактически содержит коэффициент диффузии с разрывами первого рода. Интегрирование таких уравнений наиболее удобно проводить с использованием интегро-интерполяционных методов³. Результаты интегрирования приведены на рисунке 3.

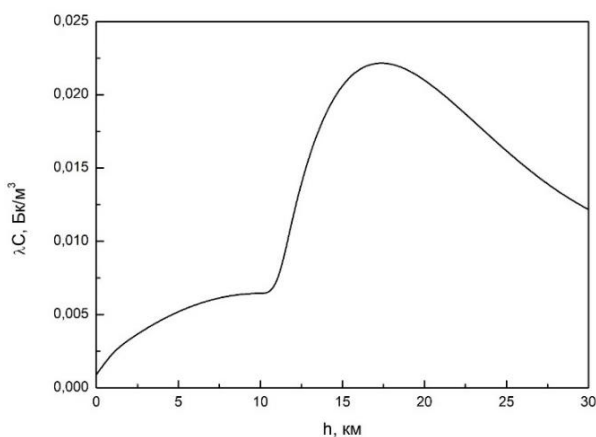


Рисунок 3. Высота зависимость концентрации трития в земной атмосфере [составлено авторами]

Figure 3. Altitude dependence of tritium concentration in the Earth atmosphere [compiled by the authors]

³ Самарский А.А. *Теория разностных схем*. – Москва: Наука, 1989. – 614 с. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/record/01001539782> (дата обращения: 22.12.2023).

Немонотонное поведение объемной активности космогенного трития с высотой, представленной на рисунке 3, качественно объясняется следующим образом. Характерный излом на высоте примерно 11 км связан, как указывалось выше, с тропопаузой на этой высоте. Аналогичные особенности наблюдаются в высотной зависимости и других космогенных изотопов, например Be-7 [7]. Наличие максимума объемной активности на высоте примерно 17 км объясняется тем, что на этой высоте достигается максимальная скорость генерации трития (см. рис. 2). На этой же высоте потоки протонов и нейтронов в ядерно-электромагнитном каскаде также достигают своего максимального значения (см., например, [5]). На высотах больше, чем 17 км скорость образования трития в одном грамме воздуха практически не изменяется (см. рис. 2), а поскольку плотность атмосферы уменьшается с высотой, то объемная активность на высотах больше, чем 17 км также начинает уменьшаться.

Заключение

Полученные результаты позволяют оценить общий запас космогенного трития в земной атмосфере. Полагая, что площадь земной поверхности составляет величину $\sim 5.1 \cdot 10^{14} \text{ м}^2$, после интегрирования объемной активности $\lambda C(z)$ по высоте и умножения на площадь земной поверхности получим величину $\sim 1.9 \cdot 10^{17}$ Бк. Это сбалансированное турбулентной диффузией, распадом и космогенным образованием значение атмосферного содержания трития. Для сравнения отметим, что общий запас космогенного трития по разным оценкам [8], включая гидросферу и литосферу, составляет величину в пределах от $\sim 9 \cdot 10^{17}$ Бк до $\sim 1.8 \cdot 10^{18}$ Бк. Таким образом, результаты расчетов в модели «PARMA» показывают, что в земной атмосфере содержится не более 10% от всего космогенного трития. Следует отметить, что в ходе ядерных испытаний 60-х годов по оценкам⁴ в атмосферу было выброшено порядка $2.4 \cdot 10^{20}$ Бк трития, то есть, почти на два порядка больше естественного количества. Таким образом несмотря на то, что со временем проведения испытаний количество трития уменьшилось в несколько раз, и при учете относительного небольшого вклада выбросов АЭС, техногенный тритий на данный момент составляет большую часть от его общего запаса.

⁴ Investigation of the Environmental Fate of Tritium in the Atmosphere. Published by the Canadian Nuclear Safety Commission. INFO-0792. 110 p. (2009). Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/10478755/investigation-of-the-environmental-fate-of-tritium-in-the-atmosphere/3> (accessed: 12.01.2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Fairlie I. Tritium hazard report: pollution and radiation risk from Canadian nuclear facilities. June 2007. Greenpeace. 92 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/237319950_Tritium_Hazard_Report_Pollution_and_Radiation_Risk_from_Canadian_Nuclear_Facilities (accessed: 12.01.2024).
2. Андреев Б.М., Магомедбеков Э.П., Розенкевич М.Б., Сахаровский Ю.А. Гетерогенные реакции изотопного обмена трития. Москва: Эдиториал УРСС, 1999. 208 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000634929> (дата обращения: 22.12.2023).
Andreev B.M., Magomedbekov E.P., Rozenkevich M.B., Sakharovsky Yu.A. Heterogeneous reactions of tritium isotope exchange. Moscow: Editorial URSS, 1999. 208 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000634929> (accessed: 22.12.2023).
3. Sato T., Niita K. Analytical functions to predict cosmic-ray neutron spectra in the atmosphere. *Radiation research*. 2006;166(3):544–555. <https://doi.org/10.1667/RR0610.1>
4. Sato T., Yasuda H., Niita K., Endo A., Sihver L. Development of PARMA: PHITS-based analytical radiation model in the atmosphere, *Radiation research*. 2008;170(2):244–259. <https://doi.org/10.1667/RR1094.1>
5. Ларин А.Е., Малышевский В.С., Фомин Г.В. Высотное и широтное распределение скорости производства ^7Be в земной атмосфере в модели «PARMA». *Известия ВУЗов. Физика*. 2014;57(6):88–92. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21800559_34861733.pdf (дата обращения: 22.12.2023).
Larin A.E., Malyshevskii V.S., Fomin G.V. Altitude and latitude distribution of the production rate of ^7Be in the earth's atmosphere in the PARMA model. *Russian physics journal*. 2014;57(6):803–808. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24031421> (accessed: 22.12.2023).
6. Simon J., Meresova J., Sykora I., Jeskovsky M., Holy K. Modeling of temporal variations of vertical concentration profile of ^7Be in the atmosphere. *Atmospheric environment*. 2009;43(12):2000–2004. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.015>
7. Jasiulionis R., Wershofen H. A study of the vertical diffusion of the cosmogenic radionuclides, ^7Be and ^{22}Na in the atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005;79(2):157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.06.003>
8. Десятов Д.Д., Екидин А.А. Оценка поступления трития в окружающую среду от выбросов АЭС. *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2018;1(21):88–96. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_34959688_46935708.pdf (дата обращения: 12.01.2024).
Desyatov D.D., Ekidin A.A. Evaluation of tritium's entry into the environment from nuclear power plants' emissions. *Biosphere compatibility: people, region, technologies*. 2018;1(21):88–96. (In Russ.) Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_34959688_46935708.pdf (accessed: 12.01.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Куделя С.А. – проведение численных расчетов;
Малышевский В.С. – постановка задачи, выбор методов решения, подготовка текста статьи;
Фомин Г.В. – разработка алгоритмов и программного обеспечения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Инициативное исследование.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Савелий Александрович Куделя, физический факультет Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9534-5758>

e-mail: kudelya@sfedu.ru

Вячеслав Сергеевич Малышевский, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей физики физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-5496>

e-mail: vsmalyshevsky@sfedu.ru

Георгий Викторович Фомин, кандидат физико-математических наук, доцент физического факультета Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1672-2844>

e-mail: fomin@sfedu.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kudelya S.A. – carrying out numerical calculations;
Malyshevsky V.S. – statement of the problem, choice of solution methods, preparation of the text of the article;
Fomin G.V. – development of algorithms and software.

FUNDING:

Initiative Research.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Saveliy A. Kudelya, Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9534-5758>

e-mail: kudelya@sfedu.ru

Vyacheslav S. Malyshevsky, Dr. Sci. (Phys. Math.), Head of the Department of General Physics, Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-5496>

e-mail: vsmalyshevsky@sfedu.ru

Georgiy V. Fomin, Cand. Sci. (Phys. Math.), Associate Professor, Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1672-2844>

e-mail: fomin@sfedu.ru

Поступила в редакцию 14.01.2024

После доработки 01.03.2024

Принята к публикации 05.03.2024

Received 14.01.2024

Revision 01.03.2024

Accepted 05.03.2024

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

УДК: 504.064

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

EDN CUEEXB

Оригинальная статья / Original paper




Радиоэкологическая обстановка на отдельных территориях
Южного федерального округа

Д.П. Плахотная¹, Е.А. Бурева¹  , В.И. Ратушный² 

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

² Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета

«МИФИ», г. Волгодонск, Российская Федерация

 buraeva@sfedu.ru

Аннотация. Радиоэкологический мониторинг природных и урбанизированных территорий предназначен не только для оценки последствий работы предприятий ядерной топливной энергетики, но и для обеспечения радиационной безопасности человека и окружающей среды. Подобного рода позволяют не только выявлять территории с повышенным радиационным фоном, но и снижать социальную напряженность населения, связанную с радиофобией. В данной работе представлены результаты длительных исследований мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД, МЭД) гамма-излучения в пределах городских и сельских населенных пунктов Южного федерального округа на примере Краснодарского края. Измерения МАЭД проводились на высоте 100 см от поверхности земли дозиметрами-радиометрами СРП-88н, ДРБП-03 и ДКС-96с с блоком детектирования БДКС-96с методами пешеходной гамма-съемки. Регионы исследования представляют различные типы ландшафтов: степные равнинные территории, предгорья Северного Кавказа и побережье Черного моря. Показано, что средние арифметические значения МАЭД в городских условиях составляют 0.11 мкЗв/ч, а в сельских населенных пунктах – 0.14 мкЗв/ч. Подобные результаты могут быть обусловлены различием почвенных и климатических условий в разных населенных пунктах. В целом, различия в МАЭД гамма-излучения могут быть обусловлены в большей степени неопределенностью измерений (стандартным отклонением), а также, в меньшей степени, особенностями рельефа и содержанием радионуклидов в почвах данного региона. Радиационная обстановка на территории Краснодарского края на момент исследования соответствует требованиям СанПиН 2.6.1.2612-10. Значения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения находятся в пределах колебаний естественного фона, характерных для Российской Федерации.

Ключевые слова: мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, Краснодарский край, источники ионизирующих излучений, радиационная безопасность, распределение.

Для цитирования: Плахотная Д.П., Бурева Е.А., Ратушный В.И. Радиоэкологическая обстановка на отдельных территориях Южного федерального округа. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):22-28. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-03>


For citation: Plahotnyaya D.P., Buraeva E.A., Ratushnyj V.I. Radioecological situation in certain areas of the Southern Federal District. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):22-28 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-03>

Radioecological situation in certain areas of the Southern Federal District

Dariy P. Plahotnyaya¹, Elena A. Buraeva¹  , Viktor I. Ratushnyj² 

¹ Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

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

 buraeva@sfedu.ru

Abstract. Radioecological monitoring of natural and urban areas is intended not only to assess the consequences of the operation of nuclear fuel energy enterprises, but also to ensure radiation safety of humans and the environment. This type of research allows not only to identify areas with increased background radiation, but also to reduce social tension in the population associated with radiophobia. This paper presents the results of long-term studies of the ambient dose equivalent rate (ADR) of gamma radiation within urban and rural settlements of the Southern Federal District using the example of the Krasnodar Territory. ADR measurements were carried out at a height of 100 cm from the earth's surface using dosimeters-radiometers SRP-88n, DRBP-03 and DKS-96s with a detection unit BDKS-96s using pedestrian gamma survey methods. The study regions represent different types of landscapes: steppe plain territories, the foothills of the North Caucasus and the Black Sea coast. It is shown that the arithmetic average ADR values in urban conditions are 0.11 μ Sv/h, and in rural settlements – 0.14 μ Sv/h. Similar results may be due to differences in soil and climatic conditions in different settlements. In general, differences in gamma radiation ADR may be due to a greater extent to measurement uncertainty (standard deviation), and also, to a lesser extent, to relief features and the content of radionuclides in the soils of a given region. The radiation situation in the Krasnodar Territory at the time of the study complies with the requirements

of SanPiN 2.6.1.2612-10. The gamma radiation equivalent dose rate values are within the limits of natural background fluctuations characteristic of the Russian Federation.

Keywords: ambient dose equivalent rate of gamma radiation, Krasnodar region, sources of ionizing radiation, radiation safety, distribution

Введение

Природные условия (геологические и тектоническое строение, почвенный покров, высота над уровнем моря) формируют в каждой точке земного пространства природный радиационный фон¹, который характеризуется мощностью амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД, МЭД). МАЭД от природных источников ионизирующего излучения напрямую зависит от естественных радионуклидов земного происхождения (радиоактивные семейства урана и тория, ⁴⁰K) и от величины космического излучения в конкретном регионе [1].

Несмотря на то, что результаты человеческой деятельности, связанные с испытанием ядерного оружия и аварии на атомных электростанциях привели к значительному загрязнению территорий искусственными радионуклидами, все же естественное ионизирующее излучение вносит наибольший вклад в коллективную эффективную дозу, получаемую населением Земли. В целом «...более 60% естественного радиационного фона приходится на космические лучи, земные радионуклиды, газ радон и его дочерние продукты распада»². Стоит подчеркнуть, что одним из наиболее значимых факторов облучения населения является внешнее облучение от загрязненных в результате аварий на АЭС наземных экосистем (почвенного покрова)³.

В настоящее время радиоэкологическое обследование различных территорий и объектов ведется Государственными надзорными органами и службами (например, Центрами гигиены и эпидемиологии Управлений федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека). А обеспечение радиационной безопасности населения всегда являлось и является одной из приоритетных составляющих национальной безопасности Российской Федерации и важнейшим элементом санитарно-эпидемиологического благополучия населения страны [2].

¹ Закутинский Д.И., Парфенов Ю.Д., Селиванова Л.Н. Справочник по токсикологии радиоактивных изотопов. – Москва: Медицинская литература, 1962. – 116 с. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006190534> (дата обращения: 01.06.2023).

² UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation) Sources and Effects of Ionizing Radiation (2000) Report to the General Assembly. Report Vol. I. 659 p. Режим доступа: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf (дата обращения: 01.06.2023).

³ IAEA Safety Standards Series. Remediation of Areas Contaminated by Past Activities and Accidents: safety requirements. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2003. – 24 p. Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1176_web.pdf (дата обращения: 01.06.2023).

Ряд независимых исследований на территориях с различными геологическими, климатическими и тектоническими условиями показывают, что уровень облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения может варьировать в достаточно широких диапазонах [3,4].

В сельскохозяйственных регионах Южного федерального на примере Краснодарского края около половины населения проживает в сельских населенных пунктах (2,5 миллиона сельских жителей из 5,9 миллионов человек, проживающих в Краснодарском крае)⁴. Стоит отметить, что исследования радиационной обстановки в Краснодарском крае на постоянной основе проводятся с 1986 года (после аварии на Чернобыльской АЭС). Исследования, проводимые Роспотребнадзором в Краснодарском крае в 2016–2017 гг., в большей части велись с целью оценки загрязнения объектов внешней среды искусственными радионуклидами. В данный момент контроль за радиационной обстановкой в крае продолжается, но ведется преимущественно на открытой местности. Однако, так как Краснодарский край имеет достаточно сложную и разнообразную структуру местности: от степных пахотных угодий до высокогорных районов, то такие подробные исследования могут быть использованы в дальнейшем.

Материалы и методы

Объектами данного исследования являлся приземный слой воздуха в городских (города Краснодар, Тихорецк, Новороссийск, Новокубанск, Анапа, Adler, Туапсе, Сочи) и сельских (Стародеревяновское сельское поселение, станицы Ленинградская, Брюховецкая, Староминская и Каневская) населенных пунктах Краснодарского края, а также на курорте Роза Хутор (рис. 1).

Измерения МАЭД проводились с использованием поисковых геологоразведочных дозиметров-радиометров, СРП-88н, ДРБП-03 и ДКС-96 с блоком детектирования БДКС-96с. Гамма-съёмка выполнялась методами пешеходной съёмки вдоль наиболее оживленных улиц на высоте 1 м над поверхностью земли [5] в каждом населенном пункте.

Результаты и их обсуждение

Одним из основных критериев оценки радиоэкологического состояния территории является мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД, мкЗв/ч), которая формируется под

⁴ Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года. – Управление Федеральной службы государственной статистики по Краснодарскому краю и Республике Адыгея. – Режим доступа: <https://23.rosstat.gov.ru/folder/179316> (дата обращения: 27.06.2023).



Рисунок 1. Карта расположения исследуемых населенных пунктов [составлено авторами]
Figure 1. Map the studied settlement location [compiled by the authors]

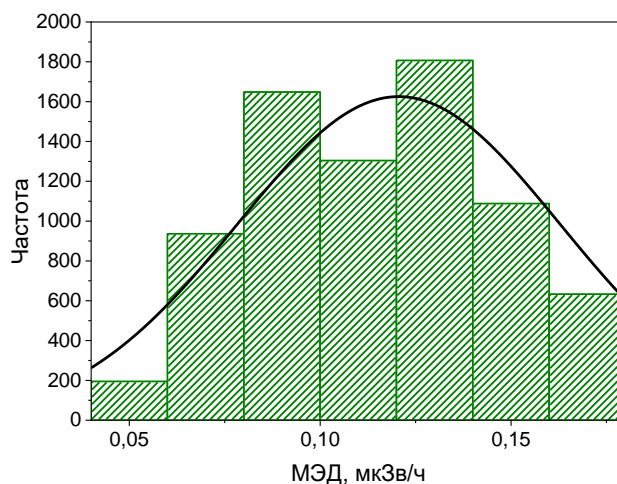


Рисунок 2. Распределение МАЭД в регионах Краснодарского края [составлено авторами]
Figure 2. Distribution of ADR in the districts of the Krasnodar region [compiled by the authors]

действием нескольких факторов: космическое излучение; содержание естественных и искусственных радионуклидов в почвах, водоемах; радиоактивные эманации из почвы (например, радиоактивный газ радон) и солнечная активность [6].

В населенных пунктах на величину МАЭД дополнительно могут оказывать влияние такие факторы как: материал дорожных покрытий и зданий/сооружений, выбросы различных промышленных предприятий, разработка месторождений полезных ископаемых. МАЭД внутри помещений довольно сильно будет зависеть от степени экранирования радона, обеспечиваемого строительными материалами [7]. На рисунке 2 представлена частотная диаграмма распределения МАЭД во всех населенных пунктах.

Измеренные значения МАЭД варьируются в довольно широком диапазоне, что может быть обусловлено как конструкционными особенностями строения детектирующих устройств, так и разнообразием территорий, на которых расположены исследуемые населенные пункты. Среднее арифметическое (0,12 мкЗв/ч), а также среднее геометрическое (0,13 мкЗв/ч) значения МАЭД в населенных пунктах Краснодарского края соотносятся со данными, получаемыми в ряде других стран [8] и не превышают гамма-фон, установленный Нормами радиационной безопасности Российской Федерации⁵.

В качестве фоновых (эталонных) значений МАЭД гамма-излучения в данной работе были приняты величины мощности амбиентного эквивалента дозы

гамма-излучения, полученные (измеренные) за пределами населенных пунктов, на удалении (по возможности) от пахотных угодий. Таким образом, для городских и сельских территорий в степных условиях Краснодарского края фоновое значение МАЭД составляет 0,13 мкЗв/ч, для побережья Черного моря – 0,09 мкЗв/ч, для предгорных районов Северного Кавказа – 0,08 мкЗв/ч.

Таблица 1. Результаты статистической обработки МАЭД гамма-излучения по всем территориям Краснодарского края [составлено авторами]

Table 1. Results of statistical processing of gamma radiation ADR for all territories of the Krasnodar Region [compiled by the authors]

Параметр	Все населенные пункты	Города	Станицы
Минимум, мкЗв/ч	0,01	0,01	0,01
Максимум, мкЗв/ч	0,30	0,25	0,30
Среднее арифметическое, мкЗв/ч	0,12	0,11	0,14
Среднее геометрическое, мкЗв/ч	0,13	0,11	0,12
Медиана, мкЗв/ч	0,12	0,11	0,14
Мода, мкЗв/ч	0,12	0,08	0,12
Стандартное отклонение	0,04	0,03	0,05
Коэффициент вариации, %	33	27	36
Распределение Колмогорова-Смирнова (D/D _{табл})	0,44/0,01	0,07/0,02	0,07/0,03
Приблизительный критерий	4,62	1,75	2,29
Количество измерений, шт	8601	4838	3763

⁵ СанПин 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). – Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г. № 47 с 01 сентября 2009 г. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 27.06.2023).

Далее на рисунке 3 представлено распределение МАЭД гамма-излучения в городах и станицах, а в таблицах 1 и 2 приведены результаты статистической обработки измеренных МАЭД в населенных пунктах Краснодарского края.

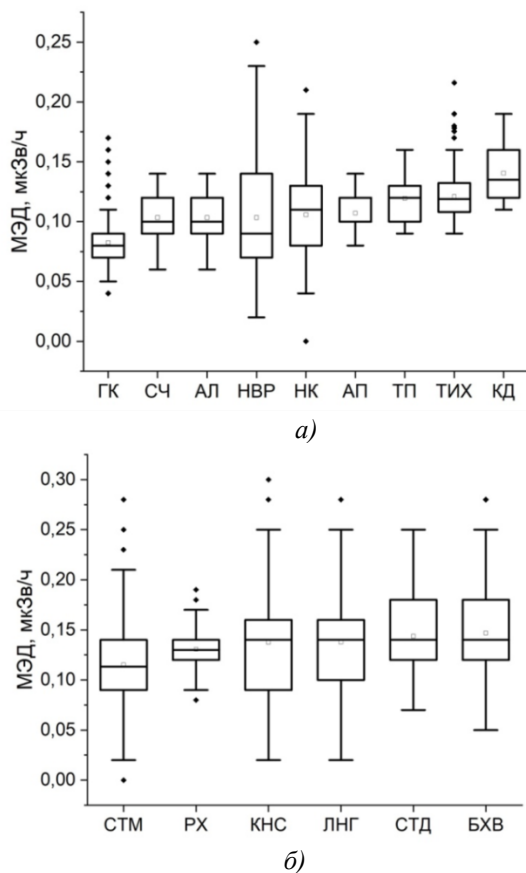


Рисунок 3. Распределение МАЭД гамма-излучения на территориях Краснодарского края: а) городские территории: ГК – Горячий ключ, СЧ – Сочи, АЛ – Adler, НВР – Новороссийск, НК – Новокубанск, АП – Анапа, ТП – Туапсе, ТИХ – Тихорецк, КД – Краснодар; б) сельские территории: СТМ – станция Староминская, РХ – курорт Роза Хутор, КНС – станция Каневская, ЛНГ – станция Ленинградская, СТД – Стародеревянковское сельское поселение, БХВ – станция Брюховецкая [составлено авторами]

Figure 3. Distribution of gamma radiation ADR in the territories of the Krasnodar Region: a) urban areas: ГК – Goryachiy Klyuch, СЧ – Sochi, АЛ – Adler, НВР – Novorossiysk, НК – Novokubansk, АП – Anapa, ТП – Tuapse, ТИХ – Tikhoretsk, КД – Krasnodar; b) rural areas: СТМ – Starominskaya village, РХ – Rosa Khutor resort, КНС – Kanevskaya village, ЛНГ – Leningradskaya village, СТД – Staroderevyankovskoe rural settlement, БХВ – Bryukhovetskaya village [compiled by the authors]

Средние арифметические значения МАЭД в городах и в станицах различаются незначительно, в пределах неопределенности измерения (30%), при этом среднее арифметическое значение МАЭД в городах (0,11 мкЗв/ч) несколько ниже, чем в станицах (0,14 мкЗв/ч). Это может быть обусловлено тем, что исследуемые сельские населенные пункты расположены в пределах степных территорий Краснодарского края, с достаточно высокой запыленностью приземного слоя воздуха.

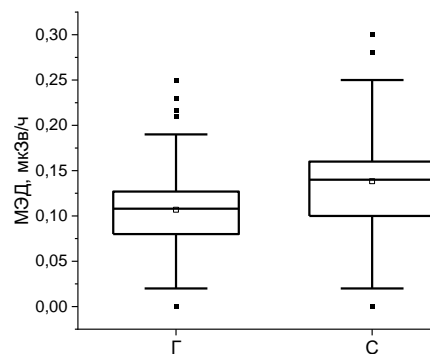


Рисунок 4. Распределение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в станицах и городах Краснодарского края (Г – городские населенные пункты, С – сельские населенные пункты) [составлено авторами]

Figure 4. Distribution of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the villages and cities of the Krasnodar Region (Г – urban settlements, С – rural settlements) [compiled by the authors]

В целом, широкие вариации МАЭД могут быть обусловлены как неоднородностью территорий исследования – в основном, различием в почвенном покрове, а также размерами участков исследования (размерами населенных пунктов (НП)).

Таблица 2. Результаты статистической обработки МАЭД гамма-излучения по всем населенным пунктам Краснодарского края [составлено авторами]

Table 2. Results of statistical processing of gamma radiation ADR for all settlements of the Krasnodar Region [compiled by the authors]

Название населенного пункта	Численность, чел.	МАЭД, мкЗв/ч		
		Среднее арифм. знач.	Мин. знач.	Макс. знач.
Города				
Краснодар (КД)	773 970	0,14	0,11	0,19
Сочи (СЧ)	443 644	0,10	0,06	0,14
Новороссийск (НВР)	275 197	0,10	0,02	0,25
Адлер (АЛ)	76 534	0,10	0,06	0,14
Анапа (АП)	81 447	0,11	0,08	0,14
Туапсе (ТП)	61 938	0,12	0,09	0,16
Тихорецк (ТИХ)	55 243	0,12	0,09	0,21
Новокубанск (НК)	34 391	0,11	0,02	0,21
Горячий Ключ (ГК)	69 702	0,09	0,04	0,17
Станицы				
Каневская (КНС)	44 386	0,14	0,02	0,30
Ленинградская (ЛНГ)	36 940	0,14	0,02	0,28
Староминская (СТМ)	29 809	0,12	0,02	0,28
Брюховецкая (БХВ)	22 139	0,15	0,05	0,28
Стародеревянковская (СТД)	12 998	0,14	0,07	0,25
Курорт Роза Хутор (РХ)	курорт	0,13	0,08	0,19

Полученные в разных регионах данные позволяют выявить продемонстрировать зависимость уровня МАЭД от типа почв и коренных пород, хотя причины некоторых переменных изменений еще предстоит узнать [9]. Предполагается, что «материал коренных пород выступает в качестве исходного для любых производных (вышележащих) поверхностных (т.е. неуплотненных) отложений и почв, поэтому мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения в значительной степени будет отражать естественное изменение содержания калия, урана и тория в окружающей среде» [10].

Значения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения, зафиксированные в НП, относящихся к равнинным территориям, находятся в диапазоне от 0,01 мкЗв/ч до 0,30 мкЗв/ч со средним арифметическим значением 0,13 мкЗв/ч (рис. 5). В случае расположения объекта исследования на степной местности, которая в большинстве случаев используется сельскохозяйственными отраслями, наибольший вносимый вклад в дозу гамма-излучения будут вносить минеральные удобрения с чрезвычайно разнообразным радионуклидным составом.

В предгорных районах вклад, вносимый космическим излучением, будет несколько выше, чем в других областях, хотя и не будет оказывать значительное влияние по сравнению с выходами горных пород (0,09 мкЗв/ч – среднее арифметическое МАЭД в предгорных районах) (рис. 5).

Ниже приведены результаты статистической обработки и сравнительного анализа распределения МАЭД гамма-излучения на территориях Краснодарского края в зависимости от форм рельефа региона исследования (табл. 3).

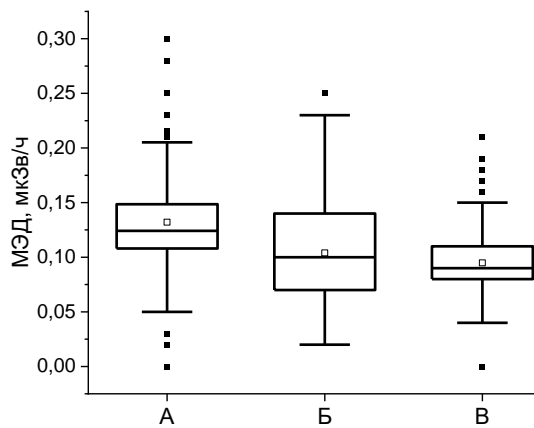


Рисунок 5. Распределение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения в зависимости от рельефа: А – равнины, Б – побережье, В – предгорья [составлено авторами]

Figure 5. Distribution of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation depending on the relief: А – plains, Б – coast, В – foothills [compiled by the authors]

Таблица 3. Результаты статистической обработки МАЭД гамма-излучения на разных элементах рельефа Краснодарского края [составлено авторами]

Table 3. Results of statistical processing of gamma radiation ADR on different relief elements of the Krasnodar Region [compiled by the authors]

Параметр	Равнины	Предгорья	Побережье
Минимум, мкЗв/ч	0.01	0.01	0.02
Максимум, мкЗв/ч	0.30	0.21	0.25
Среднее арифметическое, мкЗв/ч	0.13	0.09	0.10
Среднее геометрическое, мкЗв/ч	0.13	0.10	0.11
Медиана, мкЗв/ч	0.12	0.08	0.10
Мода, мкЗв/ч	0.12	0.08	0.12
Стандартное отклонение	0.04	0.02	0.02
Коэффициент вариации, %	31	22	20
Распределение Колмогорова-Смирнова (D/D _{табл})	0.04/0.02	0.05/0.03	0.06/0.05
Приблизительный критерий	1.89	2.07	3.12
Количество измерений, шт	5780	1973	706

В целом, различия в МАЭД гамма-излучения могут быть обусловлены в большей степени неопределенностью измерений (стандартным отклонением), а также, в меньшей степени, особенностями рельефа и содержанием радионуклидов в почвах данного региона.

Заключение

Радиационная обстановка на территории Краснодарского края на момент исследования соответствует требованиям СанПиН 2.6.1.2612-10. Значения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения находятся в пределах колебаний естественного фона, характерных для Российской Федерации.

Для долговременного обеспечения радиационной безопасности необходима организация радиационного мониторинга территории. Материалы, представленные в данной статье, могут служить основой для сравнительного анализа результатов такого мониторинга.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пономаренко П.А., Фролова М.А., Кравченко Н.В. Анализ радионуклидной активности и годовой эквивалентной дозы, создаваемой природными радионуклидами. *Энергетические установки и технологии*. 2016;2(1):93–99. Режим доступа: <https://www.sevsu.ru/upload/iblock/b38/agk6yvvjevz5u98emyfn0thgfc8hxrvk/Energy2016-1.pdf> (дата обращения: 27.06.2023).
Ponomarenko P.A., Frolova M.A., Kravchenko N.V. Analysis of radionuclide activity and annual equivalent dose produced by natural radionuclides. *Power plants and technologies*. 2016;2(1):93–99. (In Russ.) Available at: <https://www.sevsu.ru/upload/iblock/b38/agk6yvvjevz5u98emyfn0thgfc8hxrvk/Energy2016-1.pdf> (accessed: 27.06.2023).
2. Онищенко Г.Г., Романович И.К. Деятельность Роспотребнадзора по обеспечению радиационной безопасности населения России. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2013;2:35–40. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18792698_43388497.pdf (дата обращения: 01.06.2023).
Onishchenko G.G., Romanovich I.K. Activities of Rosпотребнадзор to ensure radiation safety of the population of Russia. *Health care of the Russian Federation*. 2013;2:35–40. (In Russ.) Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_18792698_43388497.pdf (accessed: 01.06.2023).
3. Кулганов В.А., Соколов Д.А. Социально-экологические последствия антропогенного и военного воздействия на природную среду. 2017 год глазами ученых: результаты научных исследований: Сборник трудов. Краснодар. 2018. С. 85–92. Режим доступа: <https://pureportal.spbu.ru/ru/publications/-----59790bed-555d-44d5-ad39-3718339173cd/export.html> (дата обращения: 01.06.2023).
Kulganov V.A., Sokolov D.A. Socio-ecological consequences of anthropogenic and military impact on the natural environment. 2017 through the eyes of scientists: results of scientific research: Collection of works. Krasnodar. 2018. P. 85–92. (In Russ.) Available at: <https://pureportal.spbu.ru/ru/publications/-----59790bed-555d-44d5-ad39-3718339173cd/export.html> (accessed: 01.06.2023).
4. Кулганов В.А., Косырев С.В., Васнецов К.С. К вопросу оценки поражающего воздействия ионизирующего излучения на человека и защиты от него. *Технологии гражданской безопасности*. 2023;20:1(75):83–89. Режим доступа: https://vniigochs.ru/upload/medialibrary/24e/ubpxh7se80orjwm0opwg493bti9jh7zg/tgb_text_1_2023-83-89.pdf (дата обращения: 05.01.2024).
Kulganov V.A., Kosyrev S.V., Vasnetsov K.S. On the issue of assessing the damaging effects of ionizing radiation on humans and protection from it. *Civil security technology*. 2023;20:1(75):83–89. (In Russ.) https://vniigochs.ru/upload/medialibrary/24e/ubpxh7se80orjwm0opwg493bti9jh7zg/tgb_text_1_2023-83-89.pdf (accessed: 05.01.2024).
5. Акатова А.А., Ефремова М.А. Содержание радионуклидов в почвах автоморфных и гидроморфных ландшафтов Лужского района Ленинградской 38 области. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2018;4(53):87–93. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2018-14087>
Akatova A.A., Efremova M.A. Content of radionuclides in soils of automorphic and hydromorphic landscapes of the Luga district of the Leningrad 38 region. *Izvestiya Saint-Petersburg state agrarian university*. 2018;4(53):87–93. <https://doi.org/10.24411/2078-1318-2018-14087>
6. Орлов П.М., Сычев В.Г., Жиленко С.В. Радиологический мониторинг почв земель сельскохозяйственного назначения Краснодарского края. *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2015;5(27):45–50. Режим доступа: https://vek21.penzgtu.ru/wp-content/uploads/2020/04/2015_27.pdf (дата обращения: 27.06.2023).
Orlov P.M., Sychov V.G., Zhilenko S.V. The radiological monitoring of the soils of the earth of the agricultural designation of the Krasnodar edge. *XXI century: resumes of the past and challenges of the present plus*. 2015;5(27):45–50. (In Russ.) Available at: https://vek21.penzgtu.ru/wp-content/uploads/2020/04/2015_27.pdf (accessed: 27.06.2023).
7. 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>
8. 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>
9. Beamish D. Relationships between gamma-ray attenuation and soils in SW England. *Geoderma*. 2015;259–260:174–186. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.018>
10. Beamish D. Environmental radioactivity in the UK: the airborne geophysical view of dose rate estimates. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014;138:249–263. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.08.025>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Плахотная Д.П. – выполнение измерений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в регионах Краснодарского края, обработка и статистический анализ данных, оформление статьи, подбор литературных источников;

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

Ратушный В.И. – информационное обеспечение научного исследования, анализ экспериментальных данных, подготовка и опубликование результатов исследования.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Plahotnyaya D.P. – performing measurements of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the regions of the Krasnodar Territory, processing and statistical analysis of data, preparation of the article, selection of literary sources;

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

Ratushnyj V.I. – information support for scientific research, analysis of experimental data, preparation and publication of research results.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Дарья Павловна Плаhotная, лаборант-исследователь, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

e-mail: plahotnyaya@sfedu.ru

Елена Анатольевна Бурева, кандидат химических наук, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0928-1617>

e-mail: buraeva@sfedu.ru

Виктор Иванович Ратушный, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>

e-mail: VIRatushnyj@mephi.ru

FUNDING:

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

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Dariy P. Plahotnyaya research assistant, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

e-mail: plahotnyaya@sfedu.ru

Elena A. Buraeva, Can. Sci. (Chem.), Dr. Sci. (Bio.), Associate Professor, Leading Researcher, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0928-1617>

e-mail: buraeva@sfedu.ru

Viktor I. Ratushnyj, Dr. Sci. (Phys. Math.), Professor, Head of the Department of Physical and Mathematical Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>

e-mail: VIRatushnyj@mephi.ru

Поступила в редакцию 29.12.2023

После доработки 12.03.2024

Принята к публикации 14.03.2024

Received 29.12.2023

Revision 12.03.2024

Accepted 14.03.2024

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

УДК 621.039.58:621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-04>

EDN CZXZWF


Оригинальная статья / Original paper



Разработка методов и средств повышения экологической,
радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200

К.Н. Проскуряков  , М.С. Хвостова 

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

 proskuriakovkn@mpei.ru

Аннотация. Во введении проведен обзор научных исследований источников генерации, характеристик и классификации инфразвука. Отмечается, что инфразвук обладает рядом особенностей, связанных с низкой частотой колебаний упругой среды и свойством дифракции. Инфразвук оказывает вредное воздействие на слух, дыхание, зрение, желудочно-кишечный тракт, нервную и сердечно-сосудистую системы, мозг и вестибулярный аппарат, приводя к снижению работоспособности, общему недомоганию и преждевременному старению человеческого организма. Методология теоретического обоснования методов обнаружения ранее неизвестных источников инфразвука, повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200 построена на использовании разработанных под руководством К.Н. Проскурякова цифровых акустических моделей оборудования первого контура, ответственного за безопасность эксплуатации. Методология практического подтверждения результатов расчетно-теоретического прогнозирования акустических параметров неизвестных ранее источников инфразвука представлена в виде двух этапов: а) разработка методики проведения верификации результатов прогнозирования и выбор в виде объектов энергоблока № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2; б) исследование условий возникновения вибро-инфразвуковых резонансов в первом контуре. Разработанный метод исследования источников инфразвука верифицирован на реакторной установке ВВЭР-1200. При обсуждении результатов проведенных исследований выявлены ранее неизвестные источники инфразвука. Разработаны инновационные методы анализа и демпфирования источников инфразвука и получен патент на изобретение № 2803181 «Способ предотвращения резонансного взаимодействия колебаний оборудования водо-водяных энергетических реакторов с акустически стоячими волнами и устройство для его реализации». Отмечены ошибки главного конструктора реакторных установок с ВВЭР в регламенте пуска новых энергоблоков, указаны их негативные последствия для здоровья персонала и состояния оборудования ответственного за экологическую, радиационную и промышленную безопасности АЭС с ВВЭР.

Ключевые слова: инфразвук, вибрации, резонанс, спектр отклика, акустические стоячие волны, землетрясение, регламент пуска новых энергоблоков.


Для цитирования: Проскуряков К.Н., Хвостова М.С. Разработка методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):29–36. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-04>

For citation: Proskuryakov K.N., Khvostova M.S. Development of methods and means to improve environmental, radiation and industrial safety of NPPs with WWER-1200. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):29-36 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-04>

Development of methods and means to improve environmental, radiation and industrial
safety of NPPs with WWER-1200

Konstantin N. Proskuryakov  , Marina S. Khvostova 

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

 proskuriakovkn@mpei.ru

Abstract. The introduction provides an overview of scientific research on the sources of generation, characteristics and classification of infrasound. It is noted that infrasound has a number of features related to the low oscillation frequency of the elastic medium and the diffraction property. Infrasound has harmful effects on hearing, breathing, vision, gastrointestinal tract, nervous and cardiovascular systems, brain and vestibular apparatus, leading to decreased performance, general malaise and premature aging of the human body. The methodology of theoretical substantiation of methods for detecting previously unknown sources of infrasound, improving the environmental, radiation and industrial safety of nuclear power plants with WWER-1200 is based on the use of digital acoustic models of primary circuit equipment responsible for operational safety developed under the guidance of K.N. Proskuryakov. The methodology of practical confirmation of the results of computational and theoretical forecasting of acoustic parameters of previously unknown infrasound sources is presented in the form of two stages: a) development of a methodology for verifying forecasting results and selection of power units No. 1, 2 of Novovoronezh NPP-2 in the form of objects; b) investigation of the conditions for the

occurrence of vibro-infrasound resonances in the first circuit. The developed method for investigating infrasound sources has been verified at the WWER-1200 reactor plant. When discussing the results of the conducted research, previously unknown sources of infrasound were identified. Innovative methods of analysis and damping of infrasound sources have been developed and a patent for invention No. 2803181 «A method for preventing resonant interaction of vibrations of water-water power reactor equipment with acoustically standing waves and a device for its implementation» has been obtained. The errors of the chief designer of reactor installations with WWER in the regulations for the launch of new power units are noted; their negative consequences for the health of personnel and the condition of equipment responsible for environmental, radiation and industrial safety of nuclear power plants with WWER are indicated

Keywords: infrasound, vibrations, resonance, response spectrum, acoustic standing waves, earthquake, regulations for the start-up of new power units.

1. Введение

Биологическое действие на организм человека^{1,2}, а также экологическое и радиационное влияние АЭС на окружающую среду может быть значительно снижено при создании защиты от низкочастотных вибрации и инфразвука. Вибрационная безопасность означает «отсутствие условий, приводящих или способных привести к ухудшению состояния здоровья человека или к значительному снижению степени комфортности его труда в результате неблагоприятного воздействия вибрации. По способу передачи на тело человека вибрация подразделяется на локальную и общую. Общая вибрация подразделяется на: низкочастотную вибрацию (с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах частот 1-4 Гц – для общей вибрации, 8-16 Гц».³ Для ослабления вибраций необходима отстройка от резонансного значения частоты вынуждающей силы.

Источники, характеристика и классификация инфразвука АЭС. АЭС являются источниками инфразвуковых колебаний, например главный циркуляционный насосный агрегат (ГЦНА) имеет частоту вращения 16,6 Гц и корпус реактора (5-12 Гц), здания реакторного острова совершают низкочастотные механические колебания (инфразвук механического происхождения), а турбулентные двухфазные и однофазные потоки газов и жидкостей в оборудовании генерируют инфразвук аэродинамического или гидродинамического происхождения.

Инфразвук обладает рядом особенностей:

– во много раз большие амплитуды колебаний, чем другие акустические волны, при равных мощностях источников звука;

– распространяется на большие расстояния от источника ввиду слабого поглощения его атмосферой;

– большая длина волны приводит к дифракции (огибание волнами).

Благодаря этому инфразвуки легко проникают в помещения и обходят преграды, задерживающие слышимые звуки; инфразвуковые колебания способны вызывать вибрацию крупных объектов вследствие явлений резонанса. Особенности инфразвука затрудняют борьбу с ним, так как классические способы, применяемые для снижения шума (звукопоглощение и звукоизоляция), а также удаление от источника малоэффективны. Предельно допустимые уровни инфразвуковых волн на рабочих местах указаны в санитарных нормах⁴.

Воздействие инфразвука на организм человека.

Инфразвук является вредным фактором, оказывающим воздействующим на весь организм человека, и ухудшающим его здоровье и работоспособность. Инфразвуковые колебания изменяют нервную, сердечно-сосудистую, дыхательную, эндокринную и другие системы организма выраженность этих изменений зависит от интенсивности инфразвука и длительности воздействия. Колебания с уровнем звукового давления более 120-130 дБ в диапазоне частот от 2 до 10 Гц могут приводить к резонансным явлениям в организме. Для органов дыхания опасны колебания с частотой 1-3 Гц, для сердца – 3-5 Гц, для биотоков мозга – 8 Гц (особенно с частотой 7 Гц, так как совпадают с частотой α -ритмом биотоков мозга), для желудка – 5-9 Гц, для глазных яблок – 12-27 Гц. Инфразвуки очень высокой мощности вызывают кровоизлияния и разрывы тканей в грудной клетке и брюшной полости. Преходящие инфразвуки повышенной мощности вызывают повреждения внутренних органов [1]. Измерения инфразвука должны проводиться в соответствии с санитарными нормами⁵. Для оценки доли инфразвука в общей шумовой обстановке на рабочем месте должны быть определены следующие характеристики: спектр шума, измеренный согласно «Мето-

¹ ГОСТ 12.1.003-2014 Шум. Общие требования безопасности. Система стандартов безопасности труда. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606> (дата обращения: 20.12.2023).

² СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9051905/page/24/> (дата обращения: 13.11.2023).

³ ГОСТ 12.1.012-2004 Вибрационная безопасность. Общие требования. Система стандартов безопасности труда. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200059881> (дата обращения: 20.12.2023).

⁴ СН 2.2.4/2.1.8.583-96 Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200029239> (дата обращения: 13.11.2023).

⁵ СанПиН № 11-12 РБ 94 Санитарные нормы инфразвука на рабочих местах. – Режим доступа: <https://tnpa.by#!/DocumentCard/60217/60217> (дата обращения: 20.12.2023).

дам измерения шума на рабочих местах»⁶ с оценкой в соответствии с действующими допустимыми уровнями шума на рабочих местах. Вопросам шумового анализа уделяется большое внимание со стороны многих исследовательских коллективов и групп, что находит отражение в многочисленных публикациях [2–9]. В ряде работ высказывались обоснованные предположения о возможности возникновения резонансных явлений при совпадении частот гидродинамических колебаний теплоносителя с частотой вращения ГЦНА или ее гармониками, а также другого роторного оборудования. Однако экспериментальных работ для оценки предполагаемого эффекта до настоящего времени не проводилось.

2. Методология использования цифровых акустических моделей оборудования первого контура для теоретического обоснования ранее неизвестных источников инфразвука

Созданная цифровая акустическая модель КД не имеет аналогов; ее практическая значимость заключается в совершенствовании процессов проектирования и эксплуатации АЭС за счет учета влияния конструкций водо-водяных реакторов, трассировки трубопроводов на экологическую, радиационную и промышленную безопасность, сейсмостойкость, экономичность и срок службы оборудования.

Акустическая система реакторной установки (РУ) АЭС с ВВЭР-1200, приведенная на рисунке 1, состоит из ядерного реактора с присоединенными трубопроводами, она обладает свойствами, которые не могут быть получены простой суперпозицией акустических свойств составляющих ее элементов. Эта система представляет собой сложный резонатор Гельмгольца, способный генерировать одновременно несколько АСВ. Расчет такой системы возможен с помощью трех различных моделей (первая представляет собой систему из реактора, соединенного с последовательным объединением холодных патрубков всех четырех петель (рис. 2а); вторая – система из реактора, соединенного с последовательным объединением горячих патрубков всех четырех петель (рис. 2б); третья – это резонатор Гельмгольца, образованный соединением с параллельным объединением горячих и холодных патрубков всех петель (рис. 2в)), разработанных и представленных в статье «Цифровая акустическая модель водо-водяного энергетического реактора» [3], проведен для энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2. В таблице 1 приведены результаты расчета акустических параметров для номинального режима работы энергоблоков.

⁶ ГОСТ 12.1.050-86 Методы измерения шума на рабочих местах. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005186> (дата обращения: 20.12.2023).

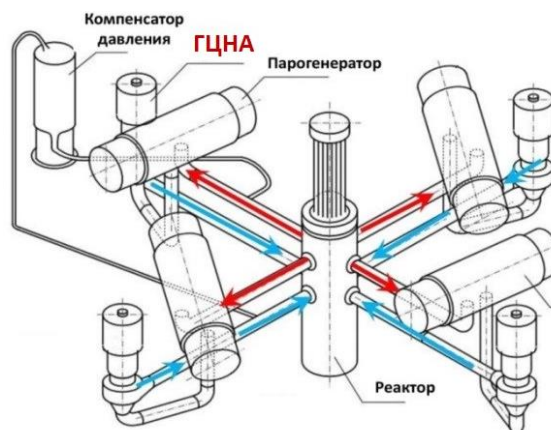


Рисунок 1. Схема четырехпетлевой реакторной установки⁷
Figure 1. Scheme of a four-loop reactor plant⁷

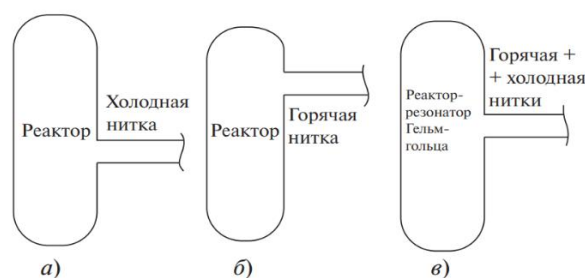


Рисунок 2. Стадии формирования сложного резонатора Гельмгольца [3]
Figure 2. Stages of formation of a complex Helmholtz resonator [3]

Таблица 1. Акустические параметры РУ с ВВЭР-1200 [составлено авторами]

Table 1. Acoustic parameters of the RP with WWER-1200 [compiled by the authors]

Наименование модели	Акустическая масса системы, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$	Акустическая податливость, $\frac{\text{м}^4 \cdot \text{с}^2}{\text{кг}}$	АСВ, Гц
Реактор + 4 «холодные» нитки	87200	$7,00 \cdot 10^{-8}$	2,04
Реактор + 4 «горячие» нитки	60900	$7,00 \cdot 10^{-8}$	2,44
Реактор + 4 ХН + 4 ГН	35900	$7,00 \cdot 10^{-8}$	6,35

Модели могут быть адаптированы и применены к ВВЭР независимо от их геометрических размеров, а также к однофазному и двухфазному состояниям теплоносителя в условиях принудительной или естественной циркуляции. Экстраполированная, показанная на рисунке 3 для температуры 360°C, частота АСВ равная 6,5 Гц практически совпадает с частотой АСВ равной 6,35 Гц приведенной в таблице 1.

⁷ K.N. Proskuryakov, M.S. Khvostova, R.M. Ismail, M.M. Kaverznev, K.A. Yakovlev, Application of information technology to create the digital acoustic models of WWER. Nuclear Engineering and Design. Volume 421, 2024, 113098, ISSN 0029–5493.

3. Методология практического применения результатов расчетно-теоретического прогнозирования неизвестных ранее источников инфразвука на энергоблоках №1, 2 Нововоронежской АЭС-2

Описание методов и результатов исследований приведено в публикации «Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200» [10]. Выявлены причинно-следственные связи между эксплуатационными режимами РУ и изменениями в шумовых сигналах. Серия нейтронно-шумовых исследований выполнена с целью получения реперных характеристик для всех РУ данной серии. Многоканальный нейтронно-шумовой эксперимент позволил выявить ранее неизвестные факторы, влияющие на ресурсные характеристики, но неучтенные в проекте. В нормах проектирования сейсмостойких атомных станций показана процедура полного разогрева энергоблока⁸. В работе «Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200» показано, что главный циркуляционный контур (ГЦК) последовательно проходит через 8 режимов резонансного возбуждения вибраций, обусловленными гидродинамическими воздействиями. На рисунке 3 приведены линейные аппроксимации температурных зависимостей частот АСВ. Там же показаны точки совпадения частот АСВ и трех первых гармоник оборотной частоты ГЦНА. Совпадения частот гармоник оборотных частот ГЦНА и частот АСВ, возникают регулярно и многократно при разогреве/расхолаживании блока в диапазоне рабочих температур теплоносителя, но без заметных изменений вибрационных характеристик, регистрируемых проектными средствами.

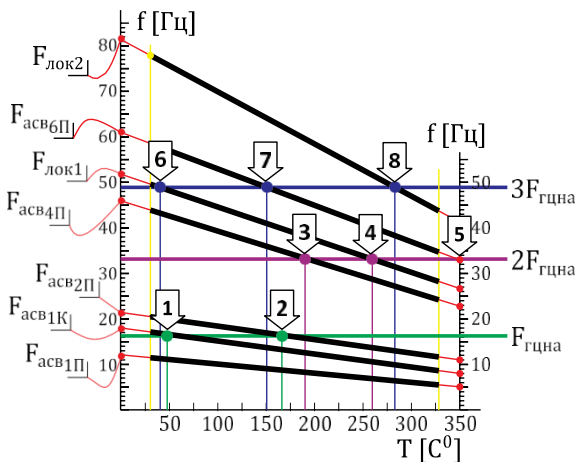


Рисунок 3. Восемь точек резонансов частот колебаний давления теплоносителя, которые вызваны гармониками оборотных частот ГЦНА, с частотами АСВ [10]

Figure 3. Eight points of resonance of coolant pressure oscillation frequencies, which are caused by harmonics of the [10] circulating frequencies of the main circulation pump, with the frequencies of the ASW [10]

⁸ Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01. – Вестник Госатомнадзора России. – 2001. – № 9. – С. 1-29. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815342.pdf> (дата обращения: 26.12.2023).

Указанные режимы резонансного возбуждения не учтены главным конструктором АЭС с ВВЭР при оценке ресурсных характеристик и не описаны в эксплуатационной документации, как режимы, требующие минимального времени их прохождения [10]. Выявление неучтенных и ранее неизвестных причин резонансного возбуждения является доказательством необходимости проверки главным конструктором АЭС с ВВЭР соответствия действующим допустимым уровням шума на рабочих местах при пуске каждого энергоблока [11].

Проектное обоснование сейсмической безопасности АЭС. Обоснование должно проводиться поэлементно для всех важных для безопасности элементов: зданий и внешних инженерных сооружений и осуществляться по исходным сейсмическим данным в соответствии с действующими нормативными документами и установленными в них требованиями и критериями (НП-031-01, см. постраничную сноску 7). Как указано в одном из фундаментальных исследований [12], при пуске каждого нового энергоблока применим только метод поэлементной проверки, важных для безопасности систем энергоблоков АЭС. Поскольку этот метод включает экспериментальное определение динамических характеристик (собственных частот и декрементов колебаний) в реальных условиях раскрепления и обвязки и может гарантировать целостность важных для безопасности систем и выполнение их элементами своих функций при внешних воздействиях. Сейсмические нагрузки на оборудование АЭС существенно зависят как от собственных частот объекта, так и от демпфирующих процессов и характеристик (декрементов колебаний) в области резонансных частот. В работе П.С. Казновского с соавторами разработаны методологические основы подтверждения сейсмостойкости оборудования в натуральных условиях [11]. Инфразвуковые нагрузки на персонал АЭС регулируют Санитарно-эпидемиологические правила отклика на землетрясение получают в результате и нормативы⁹. В работе [12] отмечено, что спектры обобщения данных экспериментов и опыта реальных землетрясений в месте расположения АЭС. Спектр отклика зависит от места расположения АЭС. На рисунке 4 показан спектр отклика для НВАС-2 на отметке +26,30 м, на рисунке 5 приведен спектр отклика для АЭС «Аккую» на отметке +26,30 м.

⁹ Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.2.4.3359-16. – Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 21.06.2016 N 81. Введены в действие 01.01.2017. – Режим доступа: https://10.rospotrebnadzor.ru/upload/medialibrary/f42/sanpin-2.2.4.3359_16.pdf (дата обращения: 26.12.2023)



Рисунок 4. Спектр отклика для НВАЭС-2 на отметке +26,30 м a/g – амплитуда колебаний [12]
Figure 4. Response spectrum for NVNPP-2 at +26.30 m a/g – oscillation amplitude [12]

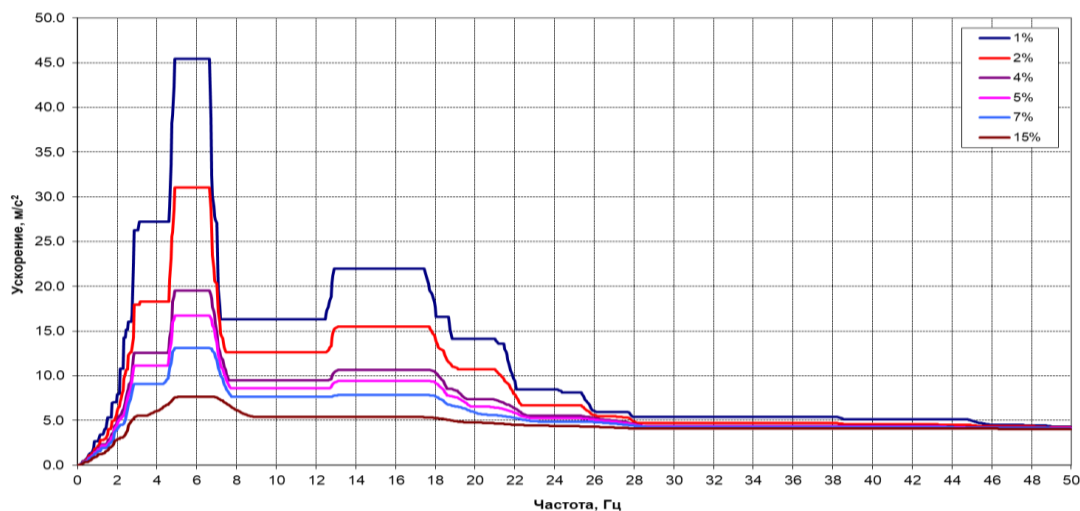


Рисунок 5. Спектр отклика на отметке +26,30 м расположения опорной фермы реактора АЭС с ВВЭР-1200 при воздействии локального проектного землетрясения. Цветом обозначены разные декременты колебаний¹⁰
Figure 5. Response spectrum at elevation +26.30 m of the location of the support frame of the NPP with WWER-1200 under the influence of a design local basis earthquake. The colours indicate different decrements of oscillations¹⁰

4. Обсуждение методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200

В работе [12] показано, что сложная геометрическая форма трубопроводов может приводить не только к увеличению гидравлических потерь и ухудшению тепло-массообменных процессов вследствие генерации крупномасштабных вихревых структур, но и возбуждению акустических колебаний.

В публикации [13] проведено сопоставления частот, генерируемых крупными вихревыми структурами в элементах трубопроводов, с собственными частотами акустических элементов, рассчитанными по методике, приведенной в работе «Разработка методики расчета частот акустических стоячих волн генерируемых реакторами АЭС с ВВЭР» [14]. Обнаружено, что в зависимости от режима работы реактора генерируются частоты, способные привести к резонансным явлениям. Исследование процессов вихреобразования в сложных каналах транспортных ядерных энергетических установок представлено в [15].

АСВ в первом контуре реакторов ВВЭР признаны одной из наиболее значимых причин износа конструк-

ционных компонентов реактора. Эти волны, возникающие при работе ГЦНА могут привести к чрезмерным вибрациям, создавая угрозу целостности конструкции и надежности реактора. Необходимость смягчения этих вибраций и связанных с ними рисков привела к разработке инновационных методов их анализа и контроля. Создание цифровой акустической модели компенсатора давления [16] явилось научным прорывом, благодаря которому выяснилось, что решающую роль в демпфировании АСВ играет система КД, традиционно рассматриваемая только как элемент поддержания заданного давления в первом контуре. Действуя подобно нескольким резонаторам Гельмгольца, КД существенно снижает амплитуду и воздействие АСВ в требуемых диапазонах частот акустических волн. Способность системы компенсации

¹⁰ АЭС «Аккую». Главный циркуляционный контур. Расчет на прочность по определению нагрузок от внешних динамических воздействий на оборудование и трубопроводы. – Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 2014.

давления подавлять инфразвуковые волны повышает экологическую, радиационную и промышленную безопасность АЭС с ВВЭР.

РУ ВВЭР-1200 отличается от серийной РУ ВВЭР-1000 теплофизическими, гидравлическими параметрами и конструктивными особенностями. Эти отличия могут вызывать колебания на, ранее не известных частотах, и привести к увеличению амплитуд колебаний в результате резонансного взаимодействия (усиления). Поскольку средняя температура теплоносителя (ТН) в активной зоне ВВЭР-1200 больше по сравнению с ВВЭР -1000, в РУ с ВВЭР-1200 имеет место «недогретое» до температуры насыщения кипение ТН, что приводит к уменьшению частот АСВ обусловленных уменьшением скорости звука. Задача экспериментального оценивания скорости звука является одной из наиболее важных задач пуско-наладочных испытаний (ПНИ), т.к. позволяет получать реальные, отличающиеся от табличных, приводимых в справочниках, зависимостях скорости звука от параметров ТН. Знание реальных скоростей звука необходимо для разработки вибро-шумовых диагностических признаков проектируемых и работающих РУ. В работах [10,12] показано, что динамические и вибрационные характеристики оборудования могут быть определены только экспериментально. По экспериментальным значениям собственных частот и декрементов должны корректироваться расчетные схемы, по которым должны проводиться перерасчеты сейсмостойкости. Однако этому требованию противоречит совместное решение главного конструктора АЭС с ВВЭР и АО НТЦД АО НТЦД [17] – «датчики пульсаций давления из поставки для ВВЭР-1200 исключить». Вероятно, это ошибочное решение будет отменено Ростехнадзором, как противоречащее методологическим основам подтверждения сейсмостойкости оборудования в натуральных условиях [11]. Для повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200, а также с целью увеличения

коэффициента использования установленной мощности необходимо демпфировать соответствующую часть акустического поля ГЦК. Для демпфирования нежелательных колебаний разработан способ предотвращения резонансного взаимодействия колебаний оборудования ВВЭР с АСВ и устройство для его реализации [18] – Патент является технологической реализацией нормативного документа СанПиН 2.2.4.3359-16 (см. постраничную сноску 8).

5. Выводы

Разработаны методы и средства повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200.

Для повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200, а также с целью увеличения коэффициента использования установленной мощности предложено демпфировать с помощью системы компенсации давления инфразвуковую часть акустического поля РУ с ВВЭР.

Цифровая акустическая модель системы компенсации давления не имеет аналогов; ее практическое применение позволяет совершенствовать процессы проектирования и эксплуатации АЭС и обеспечить экологическую, радиационную и промышленную безопасность, сейсмостойкость, экономичность и срок службы оборудования.

Решение главного конструктора АЭС с ВВЭР и АО НТЦД об исключении датчиков пульсаций давления из поставки для ВВЭР-1200 противоречит нормативным документам и должно быть отменено.

В связи с резонансным характером колебательных процессов, возникающих при внешних динамических воздействиях на оборудование АЭС и вызывающих увеличение мощности источников инфразвука реальные значения этих воздействий должны измеряться при пуско-наладочных испытаниях каждого нового энергоблока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Иванов Н.И., Зинкин В.Н., Сливина Л.П. Биомеханические механизмы действия низкочастотных акустических колебаний на человека. *Российский журнал биомеханики*. 2020;24(2):216-231. doi: [10.15593/RZhBiomeh/2020.2.09](https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2020.2.09)
Ivanov N.I., Zinkin V.N., Slivina L.P. Biomechanical mechanisms of action of low-frequency acoustic vibrations on a person. *Russian journal of biomechanics*. 2020;24(2):216-231. doi: [10.15593/RZhBiomeh/2020.2.09](https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2020.2.09)
2. Проскуряков К.Н., Новиков К.С. Определение области виброакустических резонансов теплоносителя и ТВС в перспективных реакторах повышенной мощности. *Атомная энергия*. 2010;108(3):151–155. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t108-3_2010/p151/ (дата обращения: 25.12.2023).
Proskuryakov K.N., Novikov K.S. Determination of the region of vibroacoustic resonances of the coolant and fuel assemblies in promising high-power reactors. *Atomic Energy*. 2010;108(3):151–155. (In Russ.) Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t108-3_2010/p151/ (accessed: 25.12.2023).
3. Проскуряков К.Н. Цифровая акустическая модель водо-водяного энергетического реактора. *Теплоэнергетика*. 2021;9:14–20. Режим доступа: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=tepen&year=2021&vol=2021&iss=9&file=TepEn2109006Proskuryakov.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).
Proskuryakov K.N. Digital acoustic model of a water-cooled power reactor. *Thermal power engineering*. 2021;9:14–20. (In Russ.) Available at: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=tepen&year=2021&vol=2021&iss=9&file=TepEn2109006Proskuryakov.pdf> (accessed: 25.12.2023).
4. Павелко В.И. Спектральные методы оценивания времени запаздывания в реакторно-шумовых исследованиях. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 1989;2:58–65. Режим доступа: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/007/22007316.pdf (дата обращения: 25.12.2023).

Pavelko V.I. Spectral methods for estimating delay time in reactor noise studies. *Questions of atomic science and technology. Series: Physics of nuclear reactors*. 1989;2:58–65. (In Russ.) Available at: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/22/007/22007316.pdf> (accessed: 25.12.2023).

5. Thie J.A. Reactor noise monitoring for malfunctions. *Reactor Technology*. 1971;14(4):354–365. Available at: https://archive.org/details/sim_reactor-technology_winter-19711-1972_14_4/page/354/mode/2up (accessed: 25.12.2023).

6. Проскуряков К.Н. Научные основы создания и практического применения цифровой акустической модели АЭС с ВВЭР. Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы III Международной конференции. Москва, 19–23 октября 2020 года. Москва: МЭИ, 2020. С. 645–646. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=ak2rNCsAAAAJ&citation_for_view=ak2rNCsAAAAJ:qxL8FJIGzNcC (дата обращения: 25.12.2023).

Proskuryakov K.N. Scientific foundations for the creation and practical application of a digital acoustic model of nuclear power plants with WWER. Modern problems of thermophysics and energy: Materials of the III International Conference. Moscow, October 19–23, 2020. Moscow: MPEI. 2020. P. 645–646. (In Russ.) Available at: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=ak2rNCsAAAAJ&citation_for_view=ak2rNCsAAAAJ:qxL8FJIGzNcC (accessed: 25.12.2023).

7. Яскеляин А.В., Смирнов Л.В., Хайретдинов В.У. Исследование акустических колебаний теплоносителя в главном циркуляционном контуре ВВЭР-440. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС*. 2010;27:100–111. Режим доступа: <https://diss.unn.ru/files/2015/560/diss-Savikhin-560.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).

Yaskelyain A.V., Smirnov L.V., Khairetdinov V.U. Study of acoustic oscillations of the coolant in the main circulation circuit of WWER-440. *Issues of atomic science and technology. Series: Ensuring the safety of nuclear power plants*. 2010;27:100–111. (In Russ.) Available at: <https://diss.unn.ru/files/2015/560/diss-Savikhin-560.pdf> (accessed: 25.12.2023).

8. Grunwald G., Junghans K., Liewers P. Investigation of Pressure Oscillation in PWR Primary Circuit. *Progress in nuclear energy*. 1985. Vol. 15. P. 651–659. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(85\)90094-0](https://doi.org/10.1016/0149-1970(85)90094-0)

9. Махутов Н.А., Фролов К.В., Гаденин М.М. и др. Научные основы повышения малоциклового прочностного ресурса. Москва: Наука, 2006. 584 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603799> (дата обращения: 25.12.2023).

Makhutov N.A., Frolov K.V., Gadenin M.M. and others. Scientific basis for increasing low-cycle strength. Moscow: Nauka, 2006. 584 p. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603799> (accessed: 25.12.2023).

10. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2021;4:110–121. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2021/04/10.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. Phenomenology of acoustic standing waves as applied to the WWER-1200 reactor installation. *News of higher educational institutions. Nuclear energy*. 2021;4:110–121. (In Russ.) Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2021/04/10.pdf> (accessed: 25.12.2023).

11. Казновский П.С., Казновский А.П., Сааков Э.С., Рясный С.И. Нормативное регулирование в области обеспечения сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов энергоблоков АЭС. *Электрические станции*. 2012;9:17–22. Режим доступа: <https://www.asepro.ru/public/01-sejstmostojkost-ehnergoblokov.pdf> (дата обращения: 26.12.2023)

Kaznovsky P.S., Kaznovsky A.P., Saakov E.S., Ryasny S.I. Normative Regulation in the Field of Seismic Resistance of Safety Important Systems and Elements of NPP Power Units. *Electrical stations*. 2012;9:17–22. (In Russ.) Available at: <https://www.asepro.ru/public/01-sejstmostojkost-ehnergoblokov.pdf> (accessed: 25.12.2023).

12. Казновский П.С. Обоснование сейсмостойкости важного для безопасности оборудования АС в природных условиях. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.11 Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности. Москва, 2019. 299 с. Режим доступа: www.gidropress.podolsk.ru (дата обращения: 25.12.2023).

Kaznovsky P.S. Justification of the seismic resistance of NPP equipment important for safety under natural conditions. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. 05.04.11 Nuclear reactor engineering, machines, units and technology of materials for the nuclear industry. Moscow, 2019. 299 p. (In Russ.) Available at: www.gidropress.podolsk.ru (accessed: 25.12.2023).

13. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерных энергетических установок. Москва: Ленанд, 2020. Режим доступа: <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=ru&blang=ru&page=Book&id=253828> (дата обращения: 25.12.2023).

Mitrofanova O.V. Hydrodynamics and heat exchange of swirling flows in the channels of nuclear power plants. Moscow: Lenand, 2020. (In Russ.) Available at: <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=ru&blang=ru&page=Book&id=253828> (accessed: 25.12.2023).

14. Проскуряков К.Н., Белова С.К., Анисеев А.В., Афшар И. Разработка методики расчета частот акустических стоячих волн генерируемых реакторами АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;3:80–88. <https://doi.org/10.26583/GNS-2019-03-09>

Proskuryakov K.N., Belova S.K., Anikeev A.V., Afshar I. Development of methods for calculating the frequency of acoustic standing waves generated by WWER reactors. *Global Nuclear Safety*. 2019;3:80–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/GNS-2019-03-09>

15. Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш., Уртенев Д.С. Исследование процессов вихреобразования в сложных каналах транспортных ядерных энергетических установок. *Тепловые процессы в технике*. 2018;10(7–8):274–281. Режим доступа: https://mai.ru/upload/iblock/f8e/t4ecpa7mio2v5fjx5smuxnk09a4t0c1g/Mitrofanova-TPT_7_8_block_2.pdf (дата обращения: 25.12.2023).

Mitrofanova O.V., Bayramukov A.Sh., Urtenov D.S. Study of vortex formation processes in complex channels of transport nuclear power plants. *Thermal processes in technology*. 2018;10(7–8):274–281. (In Russ.) Available at: https://mai.ru/upload/iblock/f8e/t4ecpa7mio2v5fjx5smuxnk09a4t0c1g/Mitrofanova-TPT_7_8_block_2.pdf (accessed: 25.12.2023).

16. Проскуряков К.Н., Хвостова М.С., Исмаил Р.М., Яковлев К.А. Цифровая акустическая модель компенсатора давления АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):51–61. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-05>

Proskuryakov K.N., Khvostova M.S., Ismail R.M., Yakovlev K.A. Digital acoustic model of an NPP pressurizer with WWER. *Global Nuclear Safety*. 2023;13(3):51–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-05>

17. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2016;4:44–54. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

Pavelko V.I., Slepov M.T., Khairetdinov V.U. Experience in carrying out complex measurements using heterogeneous systems at various stages of startup of the WWER-1200 power unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016;4:44–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

18. Проскуряков К. Н., Аникеев А.В., Исмаил Раги Мухаммед Наср Хассанин, Макарова Л.Е. Способ предотвращения резонансного взаимодействия колебаний оборудования водо-водяных энергетических реакторов с акустически стоячими волнами и устройство для его реализации. Патент на изобретение № 2803181. Патентообладатель: ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ». Режим доступа: <https://fips.ru/EGD/d96a5948-959d-4922-9865-4515cfb4b8d0> (дата обращения: 25.12.2023).

Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Ismail Ragi Muhammad Nasr Hassanin, Makarova L.E. A method for preventing resonant interaction of oscillations of water-cooled water power reactor equipment with acoustically standing waves and a device for its implementation. Patent for invention No. 2803181. Patent holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University MPEI» Available at: <https://fips.ru/EGD/d96a5948-959d-4922-9865-4515cfb4b8d0> (accessed: 25.12.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Проскуряков К.Н. – разработка методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200, оформление материалов статьи;

Хвостова М.С. – разработка программы исследований, систематизация результатов исследований источников инфразвука в оборудовании реакторной установки ВВЭР-1200, анализ результатов расчетов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Proskuryakov K.N. – development of methods and means to improve environmental, radiation and industrial safety of NPPs with WWER-1200, design of article materials;

Khvostova M.S. – development of a research program, systematization of research results of infrasound sources in WWER-1200 reactor equipment, calculation result analysis,

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Константин Николаевич Проскуряков, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1884-5576>

Wos Researcher ID: I-3583-2017

e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

Марина Сергеевна Хвостова, кандидат географических наук, начальник отдела экологии, радиационной и промышленной безопасности; и.о. зав. кафедрой АЭС, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4141-0239>

e-mail: KhvostovaMS@mpei.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Konstantin N. Proskuryakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1884-5576>

Wos Researcher ID: I-3583-2017

e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

Marina S. Khvostova, Cand. Sci. (Geo.), Head of the Department of Ecology, Radiation and Industrial Safety, Acting Head, Department of Nuclear Power Plant, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4141-0239>

e-mail: KhvostovaMS@mpei.ru

Поступила в редакцию 08.01.2024

После доработки 15.03.2024

Принята к публикации 19.03.2024

Received 08.01.2024

Revision 15.03.2024

Accepted 19.03.2024

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

УДК 551.508.72:621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-05>

EDN DNNWVC


Оригинальная статья / Original paper



Испаритель со стабилизацией горизонтальной плоскости воды

А.Н. Шилин  , Л.А. Коновалова , М.А. Богале 

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация

 eltech@vstu.ru

Аннотация. Испарение играет важную роль в поддержании водного баланса и управлении водными ресурсами в водохранилищах. Эта проблема актуальна в жарких регионах с недостатком пресной воды. Ко всему прочему, надежное функционирование испарителей играет важную роль в предотвращении перегрева и обеспечении безопасного охлаждения реакторов, что является критическим фактором для поддержания ядерной безопасности. Полный контроль и точное измерение процесса испарения, обеспечиваемые разработанным устройством, позволяют эффективно управлять водными ресурсами, обеспечивая стабильность работы атомных электростанций и минимизируя риски для окружающей среды. Для контроля процесса испарения в водохранилищах применяются испарители. На основе проведенного анализа существующих испарителей и их недостатков был разработан испаритель со стабилизацией горизонтальной плоскости в поддоне. Благодаря этой функции разработанное устройство позволяет контролировать процесс испарения с более высокой точностью за счет уменьшения колебаний уровня воды в испарителе. Разработанное устройство содержит автономный блок питания, использующий энергосберегающую технологию на основе солнечной батареи, что обеспечивает работу без дополнительных источников. Использование такого блока питания позволяет повысить надежность работы испарителя. Одним из важных преимуществ этого устройства является использование канала передачи информации на диспетчерский пункт на основе сотовой связи, что позволяет оперативно передавать результаты контроля испарения и соответственно принимать решения по управлению водными ресурсами. Кроме того, использование системы навигации GPS позволяет точно задавать или определять координаты установки испарителя в водохранилище. Разработанное устройство может быть включено в интеллектуальную систему управления энергетическими ресурсами, его использование значительно повысит безопасность и устойчивость атомных электростанций путем улучшения контроля процесса испарения. Также оптимизирует работу атомных электростанций, способствует эффективному управлению водными ресурсами и обеспечит безопасность в области ядерной энергетики.

Ключевые слова: испарение, устройство для контроля испарения, испаритель, поддон испарителя, водная поверхность, уровень воды, водный баланс, скорость испарения, управление водными ресурсами, измерение испарения.


Для цитирования: Шилин А.Н., Коновалова Л.А., Богале М.А. Испаритель со стабилизацией горизонтальной плоскости воды. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):37–42. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-05>

For citation: Shilin A.N., Konvalova L.A., Bogale M.A. Evaporator with horizontal water plane stabilization. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):37–42 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-05>

Evaporator with horizontal water plane stabilization

Alexander N. Shilin  , Lyudmila A. Konvalova , Muluken A. Bogale 

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

 eltech@vstu.ru

Abstract. Evaporation plays an important role in maintaining water balance and managing water resources in reservoirs. This problem is relevant in hot regions with a lack of fresh water. In addition, reliable operation of evaporators plays an important role in preventing overheating and ensuring safe cooling of reactors which is critical to maintaining nuclear safety. The complete control and accurate measurement of the evaporation process provided by the developed device enables efficient water management ensuring the stability of nuclear power plants and minimising environmental risks. Evaporators are used to control the evaporation process in reservoirs. Based on the analysis of existing evaporators and their shortcomings, an evaporator with horizontal plane stabilization in the pan is developed. Due to this function the developed device allows to control the evaporation process with higher accuracy by reducing fluctuations in the water level in the evaporator. The developed device contains an autonomous power supply that uses energy-saving technology based on a solar battery which ensures operation without additional sources. The use of such a power supply increases the evaporator reliability. One of the important advantages of this device is the use of a cellular-based information transmission channel to the control center which allows to transmit the results of evaporation quickly monitoring and make water manage-

ment decisions accordingly. In addition, the use of a GPS navigation system allows to set or determine the coordinates of the evaporator installation in the reservoir accurately. The developed device can be included in an intelligent energy resource management system; its use will significantly improve the safety and sustainability of nuclear power plants by improving evaporation process control. It will also optimize the nuclear power plants operation, promote efficient management of water resources and ensure safety in the nuclear energy field.

Keywords: evaporation, evaporation control device, evaporator, evaporator tray, water surface, water level, water balance, evaporation rate, water management, evaporation measurement.

Введение

Одной из основных проблем на планете в настоящее время является жизнеобеспечение населения водными ресурсами, необходимо отметить, что в связи с потеплением на планете эта проблема становится все более актуальной. Эта проблема может быть решена более рациональным распределением водных ресурсов в водохранилищах, которые могут быть в составе различных технических систем: атомных станций, гидроэлектростанций, накопителей для гидромелиорации и др. Однако управление водными ресурсами водохранилищ и, особенно гидроэлектростанций, является довольно сложной задачей, поскольку необходим контроль и прогнозирование баланса водных ресурсов. Баланс водных ресурсов зависит от большого количества факторов: от метеорологических и гидрологических условий, объемов потребления водных ресурсов и электроэнергии населением, промышленностью, сельским хозяйством и требованиями экологии. Алгоритм системы управления гидроэлектростанцией обычно разрабатывается на основе предыдущих метеорологических и гидрологических условий и информации о задержке и текущем уровне воды в водохранилище. В зависимости от уровня воды и прогнозов ее поступления принимаются решения о досрочном сбросе воды, который позволяет избежать риска наводнений в районах ниже по течению. Уровень воды в водохранилище определяет выходную мощность гидроэлектростанции и безопасность атомных станций. Точное прогнозирование уровня воды в водохранилище гидроэлектростанции позволяет планировать выработку и стабильно снабжать потребителей электроэнергией. Необходимо отметить, что точно прогнозировать уровень воды в водохранилище является сложной задачей, так как гидротехническое сооружение представляет собой протяженный объект, на который воздействует большое количество различных случайных и непредсказуемых факторов. Поэтому для решения этой проблемы необходимо использовать соответствующий метод прогнозирования. В качестве такого метода целесообразно применять нейронные сети, которые успешно применяются при решении подобных задач. Для нормальной работы системы управления уровнем воды в водохранилище необходимо оснащение системы датчиками прихода и расхода водных ресурсов. В настоящее время существует большое количество разработанных датчиков: уровнемеров, расходомеров, климатических камер и др. Испарение является важным фактором водного баланса, но на отечественном рынке испаритель представлен очень скромно, причем одной конструкции, имеющей недостатки. В зарубежных источниках

представлены различные конструкции испарителей без сравнительного анализа, который позволял бы обоснованно выбрать вариант конструкции для конкретной задачи. Поэтому необходимо провести анализ основных конструкций испарителей и выявить тенденцию их развития. Если из существующих конструкций нет варианта, удовлетворяющего условиям технического задания, то необходимо разработать новый испаритель.

Анализ существующих методов и средств контроля испарений

Для поддержания водного баланса в водохранилище необходимо периодически получать информацию об испарении с водной поверхности. Величина испарения зависит от факторов – температуры воздуха и подстилающей поверхности, скорости ветра, влажности воздуха, осадков и др. Информация об испарении с водной поверхности, полученная с помощью испарителей, позволяет получить данные о потерях воды в реальных водохранилищах. Поэтому проведен анализ существующих методов и средств оценки испарения.

Самый простой метод заключается в том, что воду заливают в испарительный поддон, установленный рядом с оцениваемым водоемом. По мере испарения воды из поддона проводятся измерения уровня для определения скорости испарения. Однако данный метод имеет ряд недостатков. Во-первых, температура воды внутри поддона может быть выше, чем температура воды в оцениваемом водоеме, что приводит к завышению испарения. Также, растительность, характер ветра, тип почвы и содержание влаги на суше сильно влияют на скорость испарения.

Один из методов, разработанный для решения этой проблемы, заключается в размещении испарительного поддона в измеряемом водоеме путем размещения поддона на плоту, закрепленном веревками, привязанными с помощью якоря или груза к земле или донному осадку. Однако данный метод имеет ограниченную точность. Поскольку плот обычно изготавливается из дерева или пластика, эти материалы поглощают тепло и передают его в поддон/воду, повышая температуру воды в поддоне выше, чем в водоеме. Кроме того, плот поднимает поддон, так что уровень воды в поддоне выше, чем в оцениваемом водоеме, что так же отрицательно влияет на точность определения скорости испарения. Кроме того, прикрепление веревки к одной стороне плота приводит к наклону плота и поддона в одном направлении, что является источником погрешности измерения уровня воды в поддоне.

Существующие испарители и испарительные бассейны имеют разные формы и размеры, так, например, в России испарительный бассейн площадью 20 м² рекомендуется использовать в международных стандартах в качестве эталонного испарителя [1]. В бассейне устанавливается испаритель, который представляет собой бак (рис. 1), изготовленный из оцинкованного листового железа, центре которого находится реперная трубка. На эту трубку надевается объемная бюретка для наблюдения. Укрепленная на реперной трубке коленчатая игла служит указателем высоты, на которой поддерживается уровень воды в испарителе. Испаритель устанавливается в бассейне таким образом, чтобы верхние края бака находились на высоте 7,5 см над поверхностью окружающей почвы. Кроме того, для исключения влияния на точность регистрации испарения измеряется количество атмосферных осадков, уловленных дождемером, с помощью мерного стакана.

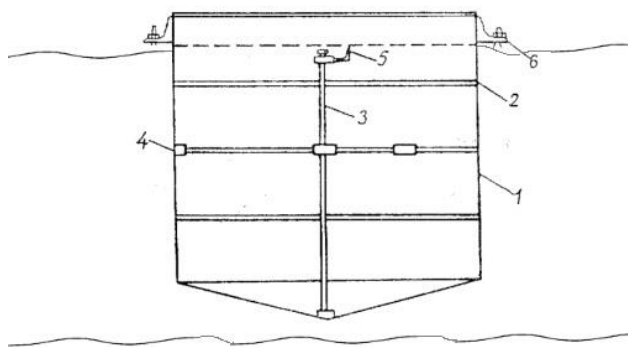


Рисунок 1. Испаритель ГГИ-3000: 1 – цилиндрический корпус с конусным дном; 2 – кольца; 3 – реперная трубка; 4 – распорки; 5 – указательная игла; 6 – ушко [1]
Figure 1. Evaporator GGI-3000: 1 – cylindrical body with a conical bottom; 2 – rings; 3 – reference tube; 4 – spacers; 5 – index needle; 6 – eyelet [1]

Кроме измерений уровня воды в испарителе и количества осадков в дождемере, также проводятся наблюдения за гидрометеорологическими параметрами (температура воды в поверхностном слое испарителя, температура и влажность воздуха, скорость ветра и другие параметры внешних факторов). Показания этого прибора соответствуют испарениям в бассейне. Недостатками прибора являются: невозможность учета обратной стратификации температуры воды в поверхностном слое испарителя (эффект «холодной пленки»), инерционность прибора и отсутствие волнения в испарителе при наличии его на водоеме, что приводит к занижению массоотдачи на 20–30%. Кроме того, испарительный бассейн может быть установлен на расстоянии от места водоема, где необходим контроль испарения, что является источником дополнительной погрешности.

Известно устройство контроля испарения с регулируемым плавающим поддоном для выпаривания открытой воды (рис. 2) [2].

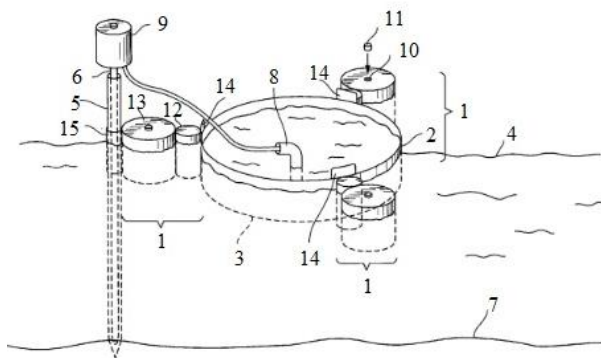


Рисунок 2. Регулируемый плавающий поддон для выпаривания открытой воды: 1 – поплавковые узлы; 2 – наружные стенки; 3 – испарительный поддон; 4 – поверхность водоема; 5 – анкерный узел; 6 – жесткая стойка; 7 – донный осадок; 8 – охлаждающий колодец; 9 – измерительное устройство; 10 – отверстие; 11 – пробки; 12, 13 – поплавки; 14 – брызговики; 15 – полый цилиндр [2]

Figure 2. Adjustable floating tray for open water evaporation: 1 – float units; 2 – outer walls; 3 – evaporation tray; 4 – reservoir surface; 5 – anchor unit; 6 – rigid stand; 7 – bottom sediment; 8 – cooling well; 9 – measuring device; 10 – hole; 11 – plugs; 12, 13 – floats; 14 – mudguards; 15 – hollow cylinder [2]

В устройстве имеется, по меньшей мере, три поплавковых узла 1, прикрепленных под углом 120 градусов вокруг внешних стенок испарительного поддона 3. Предпочтительно, чтобы каждый поплавковый узел 1 состоял из двух поплавков 12, 13, хотя изобретение может работать, если поплавковый узел 1 содержит один поплавок. Поплавковые узлы 1 содержат, по меньшей мере, часть, которая является полую. Отверстие 10 в верхней части поплавков 13 позволяет добавлять материал или субстанцию в полую часть поплавков 13. Добавление материала к поплавкам 13 позволяет регулировать плавучесть без замены поплавков. В полость поплавков может быть введен любой легкодоступный материал, причем вода предпочтительнее из-за ее веса и близости. Колпачок или пробка 11 могут быть вставлены в отверстие 10 после того, как желаемое количество материала введено в поплавок 13. Внутренний поплавок 12 прикреплен к наружным стенкам 2 испарительного поддона 3. Точка крепления между поплавками 12 и стенками 2 определяется для поддержания испарительного поддона 3 в ровном положении по отношению к поверхности 4 оцениваемого водоема.

Таким образом, если три поплавковых узла 21 используются, то их располагают на равном расстоянии друг от друга по периферии испарительного поддона 3. Анкерный узел 5 используется для поддержания положения испарительного поддона 3 в водоеме. Анкерный узел 5 содержит жесткую стойку 6, которая вбивается в донный осадок 7 водоема. Стойка 6 прикреплена с возможностью вращения к одному из поплавков 1, так что испарительный поддон 3 мог вращаться вокруг стойки 6, если на него действуют такие условия, как ветер или течение. Точка крепления между стойкой 6 и поплавковым узлом 1 противоположна точке крепления между поплавковым узлом 1 и

поддоном 3 для обеспечения равномерного, сбалансированного вращения.

Конструкция данного изобретения работает следующим образом, к дну испарительного поддона 3 прикреплен охлаждающий колодец 8. Охлаждающий колодец 8 представляет собой трубообразное приспособление с небольшим отверстием в нижней части трубы, гидрологически соединяющее воду внутри охлаждающего колодца с водой снаружи колодца, что позволяет поддерживать уровень воды внутри испарительного поддона 3. Охлаждающий колодец 8 должен быть равен уровню воды внутри поддона 3. Охлаждающий колодец 8 гасит небольшие волны давления, создаваемые условиями окружающей среды, которые могут повлиять на точность расчета скорости испарения. Если в настоящем изобретении используется колодец 8, измерительное устройство 9 будет вставлено в колодец 8 для измерения уровня воды. Эти устройства известны в данной области техники и включают в себя датчик давления, датчик положения поплавка и вала или штатный датчик. Колодец 8 может быть изготовлен из любого материала, который выдерживает воду. Например, труба из ПВХ. Брызговики 14 могут быть использованы между поплавковыми узлами 1 и испарительным поддоном 3, чтобы гарантировать, что вода не выплескивается с поверхности 4 в испарительный поддон 3. Эти ограж-

дения 14 должны проходить над верхней частью поплавковых узлов 1 и верхней кромкой испарительного поддона 3 и предпочтительно должны быть изготовлены из материала, аналогичного поплавковым узлам 1 или поддону 3.

Однако этому испарителю присущи недостатки, он эффективен только в условиях низкой волны, например, на водно-болотных участках или маленьких прудах. Воздействие волн, создаваемых ветром и человеком, вызывает покачивание поддона, что отрицательно негативно влияет на высоту жидкости внутри поддона и соответственно на устройства регулирования воды в поддоне и измерения испарения. Покачивание поддона может вызывать волны внутри поддона, которые могут перекрестываться через борт поддона, что снижает точность измерительной системы. Кроме того, волны внутри поддона увеличивают площадь соприкосновения поверхности воды с атмосферой и тем самым увеличивают интенсивность испарения.

Из вышеизложенного следует, что данное устройство не может обеспечить точную скорость испарения. Поэтому было разработано измерительное устройство со стабилизацией горизонтальной поверхности воды в поддоне (рис. 3).

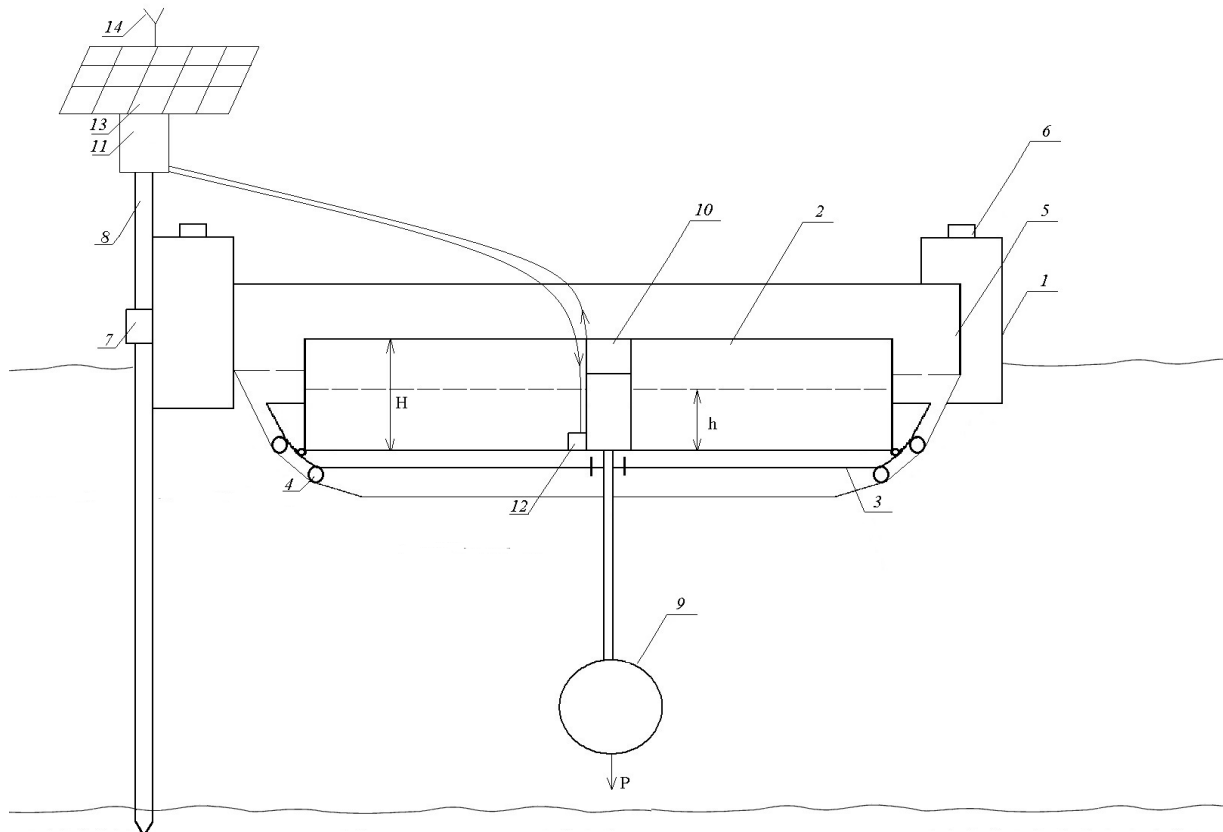


Рисунок 3. Испаритель со стабилизацией горизонтальной плоскости испарителя: 1 – корпус; 2 – испаритель; 3 – чашеобразная тарелка; 4 – шариковые подшипники; 5 – поплавковые узлы; 6 – пробка; 7 – направляющая; 8 – анкерный узел; 9 – груз; 10 – датчик уровня; 11 – блок; 12 – клапан; 13 – солнечная батарея; 14 – антенна [составлен авторами]

Figure 3. Evaporator with horizontal evaporator plane stabilization: 1 – body; 2 – evaporator; 3 – bowl-shaped plate; 4 – ball bearings; 5 – float assemblies; 6 – plug; 7 – guide; 8 – anchor assembly; 9 – load; 10 – level sensor; 11 – block; 12 – valve; 13 – solar battery; 14 – antenna [compiled by the authors]

Устройство включает в себя корпус 1 испарительного поддона с чашеобразным дном, в котором установлен испаритель 2, закрепленный в чашеобразной тарелке 3 с возможностью двух координатного перемещения в пространстве относительно вертикальной оси внутри корпуса 1. Для уменьшения силы трения свободное угловое перемещение осуществляется в шариковых подшипниках 4. К корпусу 1 вокруг внешних стенок прикреплены три поплавковых узла 5, расположенные по периметру с шагом 120°. Каждый поплавок узел 5 содержит пробку 6, через которую в камеру вливается балансный материал для регулирования уровня погружения корпуса 1 в воду. К одному из поплавков прикрепляется направляющая 7 для связи с анкерным узлом 8. К испарительной камере закреплен шарообразный груз 9, обеспечивающий горизонтальное положение жидкости в камере. Кроме того, шарообразный груз 9 в воде выполняет функцию демпфера-успокоителя колебаний (покачивания) поддона. Груз в жидкости обеспечивает вязкое трение, пропорциональное скорости перемещения. В поддоне также закреплен датчик уровня 10, который соединен с входом блока управления 11, а выход этого блока соединен с клапаном 12. Устройство содержит солнечную батарею 13, которая обеспечивает питание системы управления и клапана, и модем сотовой связи с антенной 14 для передачи информации на диспетчерский пункт.

Работает устройство следующим образом, при установке в водохранилище клапан 12 открывается с помощью схемы измерения и управления 11 и заполняется водой через отверстие в днище корпуса 1 и тарелки 3 до уровня водоема, затем клапан 12 закрывается и система работает. При испарении уровень воды понижается и регистрируется датчиком уровня 10. Как только уровень воды опускается ниже задан-

ного, регистрируется потеря жидкости от испарения и в это время дается команда на заполнение, клапан открывается и снова заливается необходимый объем жидкости.

Заключение

Испарение с водной поверхности является важным фактором, который необходимо учитывать при управлении водными ресурсами, особенно в регионах с ограниченным доступом к пресной воде. Разработанное устройство позволяет контролировать уровень воды и заполнять его при необходимости, обеспечивая более эффективное использование водных ресурсов.

Основные преимущества разработанного устройства:

1) контроль и точное измерение процесса испарения при помощи разработанного устройства позволяют эффективно управлять водными ресурсами и обеспечивать стабильную работу атомных электростанций; 2) повышение надежности устройства за счет использования автономного питания, использующего энергосберегающую технологию на основе солнечной батареи;

3) внедрение разработанного испарителя с технологией энергосбережения на основе солнечной батареи способствует повышению эффективности и устойчивости атомной отрасли;

4) применение канала связи на основе сотовой связи и системы навигации GPS для передачи информации о процессе испарения на диспетчерский пункт позволяет оперативно принимать решения по управлению водными ресурсами и обеспечивает точное определение координат установки испарителя в водохранилище.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Научно-прикладной справочник: Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети. СПб.: ООО «РИАЛ», 2021. 64 с. EDN: MDFFKJ. ISBN: 978-5-907276-32-1. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_47932585_53343484.pdf (дата обращения: 12.12.2023).

Scientific and applied handbook: Multiyear evaporation changes in the European territory of Russia according to the data of water-evaporation network. St. Petersburg: LLC «RIAL». 2021. 64 p. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_47932585_53343484.pdf (accessed: 12.12.2023).

2. Masoner J.R., Christenson S.C. Adjustable floating open-water evaporation pan. Patent 7,162,923v US11/122 202. US7162923B1 United States. Application US11/122,202 events 04.05.2005. Publication of US7162923B1 16.01.2007. Available at: <https://patents.google.com/patent/US7162923B1/en?inventor=Jason+Robert+Masoner> (accessed: 21.12.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Шилин А.Н. – идея и концепция испарителя со стабилизацией горизонтальной плоскости воды, постановка задач, научное руководство;

Коновалова Л.А. – исследование и анализ существующих методов, изучение влияния различных параметров на производительность испарителя;

Богале М.А. – анализ действия испарителя со стабилизацией горизонтальной плоскости воды.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Shilin A.N. – idea and concept of an evaporator with horizontal water plane stabilization, task setting, scientific guidance;

Konovalova L.A. – research and analysis of existing methods, study of the influence of various parameters on the performance of the evaporator;

Bogale M.A. – analysis of the action of the evaporator with horizontal water plane stabilization.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Александр Николаевич Шилин, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, Российская Федерация.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6416-4357>

e-mail: eltech@vstu.ru

Людмила Александровна Коновалова, старший преподаватель, аспирант кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, Российская Федерация

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3844-574X>

e-mail: mila27121989@mail.ru

Мулукен Асамнеу Богале, аспирант кафедры «Электротехника» Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, Российская Федерация

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4389-815X>

e-mail: mulem2as1977@gmail.com

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Alexander N. Shilin, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6416-4357>

e-mail: eltech@vstu.ru

Lyudmila A. Konovalova, Senior Lecturer, postgraduate student, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3844-574X>

e-mail: mila27121989@mail.ru

Muluken A. Bogale, Postgraduate student, Department of Electrical Engineering, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4389-815X>

e-mail: mulem2as1977@gmail.com

Поступила в редакцию 18.01.2024

После доработки 26.02.2024

Принята к публикации 29.02.2024

Received 18.01.2024

Revision 26.02.2024

Accepted 29.02.2024

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

УДК 621.314.222.6

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>


EDN ICZIKJ

Оригинальная статья / Original paper



Методы определения внутренних повреждений силовых трансформаторов

И.В. Мельников  , **В.В. Нечитайлов** , **В.Г. Бекетов** ,
И.Ю. Попова , **Н.А. Снитко** 

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


Аннотация. В связи с разнообразием возникающих дефектов в электрических машинах, необходимо применение более эффективных методов контроля их состояния. По всему миру ведутся исследования и разработки новых средств и методов контроля мощных электрических машин во время их работы. Некоторыми примерами последних достижений являются вибродиагностические методы для оценки прессовки узлов внутри трансформатора, акустические и электрические системы контроля частичных разрядов, обработка данных с использованием цифровых методов, а также новые датчики для непрерывного контроля газов и влаги в масле, а также температуры наиболее нагретых точек. Дополнительно, тепловизионный контроль при осмотрах силового оборудования также является важным инструментом для обеспечения надежной работы. Считается, что наиболее эффективным методом является газохроматографический анализ масла, который позволяет выявить большинство дефектов в маслонаполненном оборудовании. В процессе эксплуатации, мощных электрических машин применение существующих методов неразрушающего контроля не позволяет установить полную оценку состояния главных частей оборудования, как показывает анализ мест повреждений 25% являются повреждение сердечника и обмотки. Особое значение приобретает эффективный контроль состояния и определение работоспособности трансформаторов, поскольку они являются ключевыми элементами эксплуатации атомных электростанций. В работе рассматривается возможность применения вихретокового метода контроля, определение дефекта стали магнитопровода основана на фиксации неравномерности магнитного поля на горизонтальных или вертикальных плоскостях ярма или стержня состоящих из пластин электротехнической стали. Мониторинг и оценка функционирования действующего оборудования, обнаружение недостатков на ранних этапах их развития, когда расходы на ремонт еще минимальны, предотвращение аварийных отказов становятся приоритетом. В соответствии с темпом роста обнаруженных недостатков контроль осуществляется время от времени или постоянно, максимальное количество контролируемых характеристик достигается при полной проверке трансформатора с целью определения его функциональности.


Ключевые слова: блочный повышающий трансформатор, вихретоковый контроль, коэффициент полезного действия, объект контроля, вихретоковый преобразователь, ферромагнетик, неразрушающий контроль.

Для цитирования: Мельников И.В., Нечитайлов В.В., Бекетов В.Г., Попова И.Ю., Снитко Н.А. Методы определения внутренних повреждений силовых трансформаторов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):43–51 <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>

For citation: Melnikov I.V., Nechitailov V.V., Beketov V.G., Popova I.Yu., Snitko N.A. Methods of determining internal damage in power transformers. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):43–51 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>

Methods of determining internal damage in power transformers

Ivan V. Melnikov  , **Vladimir V. Nechitailov** , **Vladimir G. Beketov** ,
Irina Yu. Popova , **Natalia A. Snitko** 

Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
 comosabe@mail.ru

Abstract. Due to the variety of defects that arise in electrical machines, it is necessary to use more effective methods for monitoring their condition. All over the world research and development of new means and methods for monitoring powerful electrical machines during their operation is underway. Some examples of recent advances are vibration diagnostic methods for assessing the compaction of components inside a transformer, acoustic and electrical systems for monitoring partial discharges, data processing using digital methods, and new sensors for continuous monitoring of gases and moisture in oil, as well as hot spot temperatures. Additionally,

thermal imaging testing of power equipment is also an important tool to ensure reliable operation. It is believed that the most effective method is gas chromatographic oil analysis, which can identify most defects in oil-filled equipment. During the operation of powerful electrical machines, the use of existing non-destructive testing methods does not allow a complete assessment of the condition of the main parts of the equipment, as an analysis of damage locations shows, 25% are damage to the core and windings. Effective monitoring of the condition and determination of the performance of transformers is of particular importance, since they are key elements in the operation of nuclear power plants. The paper considers the possibility of using the eddy current testing method; determining a defect in magnetic core steel is based on fixing the unevenness of the magnetic field on the horizontal or vertical planes of a yoke or rod consisting of electrical steel plates. Monitoring and evaluating the functioning of existing equipment, detecting deficiencies in the early stages of their development, when repair costs are still minimal, and preventing emergency failures become a priority. In accordance with the growth rate of detected deficiencies, monitoring is carried out from time to time or continuously, the maximum number of monitored characteristics is achieved when the transformer is fully tested to determine its functionality.

Keywords: block step-up transformer, eddy current testing, efficiency, test object, eddy current converter, ferromagnet, non-destructive testing.

Введение

В настоящее время в энергетической отрасли наблюдаются эксплуатационные особенности, которые обуславливают повышенное внимание к надежности работы оборудования, включая силовые трансформаторы. Это привело к снижению инвестиций в обновление парка оборудования и появлению стремления максимально продлить срок эксплуатации уже используемых электрических машин.

Другой важной особенностью настоящего времени являются повышенные требования к качеству электроснабжения потребителей и надежности работы оборудования.

Для обеспечения надежной эксплуатации крупного силового оборудования, такого как трансформаторы мощностью 630 МВА (рис. 1), и шунтирующие реакторы типа РОМБСМ – 60000/500¹, установленные на Ростовской АЭС, особое внимание следует уделять эффективному контролю состояния данного оборудования. Это наиболее важно в условиях эксплуатации в Южном регионе.

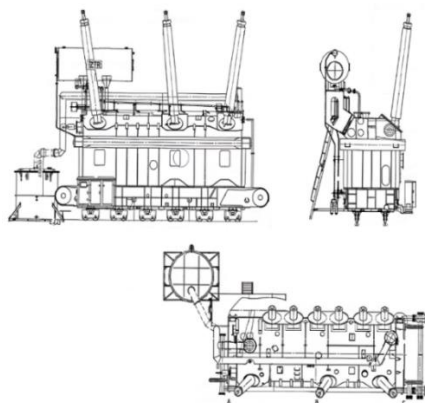


Рисунок 1. Трансформатор ТЦ-630000 кВА²
Figure 1. Transformer TC-630000 kVA²

Контролируется состояние в процессе эксплуатации и при периодических диагностиках по поддержанию работоспособности, особенно высокие требования предъявляются к блочным повышающим трансформаторам далее (БПТ) входящие в состав блока «генератор – трансформатор». Работа энергоблока непосредственно зависит от нормального режима работы БПТ и его выход из строя может привести к отключению всего блока, что в свою очередь может стать причиной разрушения энергосистемы. Для энергоблоков атомных электростанций невозможность выдавать энергию при работающем реакторе считается аварийной ситуацией. Кроме того, большая ответственность за работу всей энергосети лежит на крупных автотрансформаторах межсистемных связей и узловых подстанциях.

Для достижения высокой готовности оборудования, сокращения времени простоя и уменьшения затрат на ремонт, а также для увеличения срока службы, критически важно активно выявлять дефекты в работе и обнаруживать их на ранних стадиях. Таким образом возможно принимать своевременные и эффективные решения по их устранению и предотвращать возникновение аварийных ситуаций.³

Во время работы силовых трансформаторов необходимо контролировать их режим, включая нагрузку, рабочие напряжения и их соответствие требованиям. Учитывается длительность и частота возникновения перегрузок и перенапряжений как силового оборудования, так и во внешней сети. При необходимости проводятся обследования состояния трансформаторов. В данной статье не рассматриваются повседневный контроль режима работы и осмотры, которые являются частью процедуры эксплуатации трансформаторов.

Методы контроля электрических машин

В рамках испытаний без отключения трансформаторов от сети проводятся следующие основные мето-

¹ Рожкова Л.Д., Корнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций. – Москва: Академия, 2004. – 448 с. – Режим доступа: <https://libcats.org/book/584202.?ysclid=ltbgjtw7zf785312567> (дата обращения 10.10.2023).

² Инструкция по эксплуатации блочных трансформаторов энергоблока №3 ЗГТ-1, ЗГТ-2. – РоАЭС, 2019. – 56 с.

³ Мусаэлян Э.С. Наладка и испытание электрооборудования электростанций и подстанций. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 504 с. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/files/2020/01/10/musaelyan-es-naladka-i-ispytanie-elektrooborudovan.PDF> (дата обращения 23.10.2023).

дики: измерение частичных разрядов (ЧР), контроль вибраций, телевизионный контроль (рис. 2), ультразвуковая дефектоскопия, измерение сопротивления короткого замыкания (Зк) под нагрузкой, определение тангенса угла потерь, емкости остаточного тока и небаланса в трехфазной системе, а также отбор проб масла для последующих анализов.

Для непрерывного контроля состояния БПТ используется: газохроматографический анализ растворенных в масле газов (ГХА), измерение и локализация частичных разрядов, определение температуры наиболее нагретой точки далее (ТННТ) обмотки трансформатора.

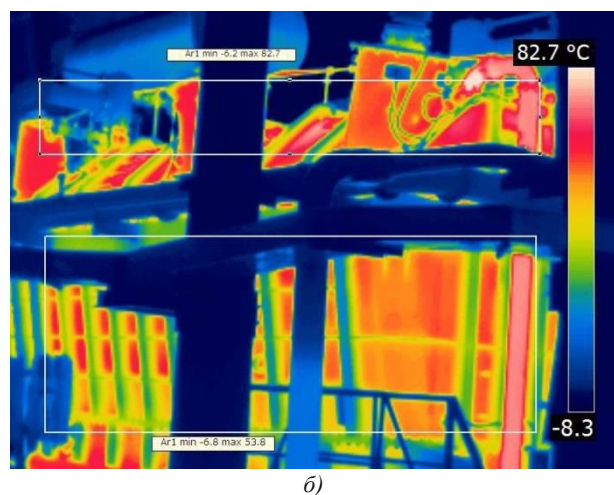
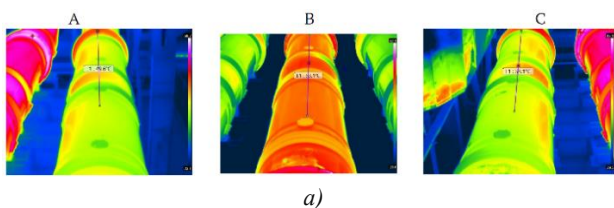


Рисунок 2. Снимки активной части трансформатора (б), место соединения токопровода со стороны низкого напряжения 24 кВ (а) трансформатора [составлено авторами]

Figure 2. Images of the transformer active part (b), the place of connection of the current collector with the low voltage side of the 24 kV (a) transformer [compiled by the authors]

Контроль теплового состояния силовых машин является важной задачей при эксплуатации и изменении режима в энергосистеме. Для осуществления такого контроля применяются как косвенные методы, так и методы измерения ТННТ трансформатора, такие измерения позволяют оценить перегрузочную способность. Контроль во время работы позволяет определить оптимальное количество работающих вентиляторов и насосов в зависимости от окружающей температуры и нагрузки на трансформатор. Это помогает повысить КПД системы, уменьшить потери в системе охлаждения и предотвращать возможные дефекты в активной части трансформатора [1:110–131].

Анализ повреждений оборудования

Для выявления повреждений в магнитопроводах, связанных с дефектами в межлистовой изоляции и с нарушением изоляции вспомогательных деталей,

производят испытание качества изоляции стержневых шпилек, ярмовых балок, межлистовой изоляции активной стали магнитопровода, измерение потерь и тока холостого хода.

Для наглядности анализа и определения степени надежности работы трансформаторов необходимо иметь представительную выборку эксплуатационных данных, указанных в таблице 1, а также информацию о аномальных режимах отдельных узлов:

- дифференциация повреждений по основным узлам трансформаторов разных классов напряжений;
- характеристики степени повреждений;
- причины и тяжесть в последствии при коротких замыканиях;
- период повреждений в зависимости от срока службы трансформаторов.

Таблица 1. Повреждения силовых трансформаторов основных частей, с учетом продолжительности их эксплуатации [составлено авторами с использованием данных ЕЭС России⁴]

Table 1. Damage of power transformers of main parts taking into account the duration of their operation [compiled by the authors using data from the Unified Energy System of Russia⁴]

Узел	Число повреждений по продолжительности эксплуатации					Всего
	10 лет	10-20 лет	20-30 лет	30-40 лет	более 40 лет	
Обмотки	13	17	23	19	12	116
Магнитопровод	2	6	7	12	14	41
РПН	12	18	21	10	8	69
Вводы	15	17	18	31	9	90
Течь масла	12	16	19	11	3	61

Анализ показал, что внутренние короткие замыкания в трансформаторах напряжением 110–500 кВ в основном происходят из-за повреждений разъемных присоединений, высоковольтных вводов, корпусов и обмоток трансформаторов. Наиболее тяжелые последствия могут возникать на этапе сборки, но в основном в процессе эксплуатации силового оборудования:

- снижение электрической прочности масляного канала высоковольтных герметичных вводов из-за отложения осадка на внутренней поверхности фарфора и на поверхности внутренней изоляции, а также из-за коллоидного старения масла;
- скопление и образование влаги, загрязнение и износ изоляции обмоток трансформаторов;
- спекание, разрушение изоляции в результате термического воздействия на обмотку из-за длитель-

⁴ Системный оператор Единой энергетической системы (ЕЭС России). – Режим доступа: https://www.sos-ops.ru/functioning/ups/indicators/ees-temperature/?tx_mscdugraph_pi%5Bcontroller%5D=Graph&tx_mscdugraph_pi%5Baction%5D=fullview&tx_mscdugraph_pi%5BviewDate%5D=2024-03-06&tx_mscdugraph_pi%5BviewKpo%5D=550000 (дата обращения: 10.10.2023).

ного неотключения сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора;

- снижение изоляционных свойств активной стали;
- некачественный монтаж, ремонт.

К распространенным повреждениям магнитопровода (рис. 3) относятся: общее старение межлистовой изоляции, местные перегревы под действием вихревых токов или токов, наводимых в короткозамкнутых контурах, образующихся в результате нарушения изоляции активной стали в местах соприкосновения с центрирующими втулками ярмовых балок 1 и 4, винтами для прессовки обмоток 7, забоинами и т.п., а также нарушения схемы заземления. Дефекты в магнитопроводе могут формироваться еще при сборке трансформатора, в активной стали, при прессовке продавливают изоляцию соседних пластин и образуют каналы внутри сечения ярма или стержня, формируя короткозамкнутый виток. Если такой дефект еще не вызвал заметных следов «пожара стали», то при таких повреждениях изоляции межлистовой стали вихревые токи складываются и приводят к выгоранию пластин, которые можно устранить только их полной заменой и обнаружить такие дефекты в собранном трансформаторе крайне трудно. Такие дефекты большей частью отмечаются на стыках стержней и ярм, ближе к внутренним углам окна магнитопровода. Это объясняется тем, что во внутренних углах магнитопровода имеет место наибольшая индукция магнитного поля. Необходимо помнить о еще одном опасном повреждении магнитопровода, при конденсации влаги на поверхности масла возможно выпадение осадка на верхнее ярмо. Частицы жидкости попадают в межлистовую сталь трансформатора, с нагретым маслом образуют смесь водомасляной эмульсии, которая в процессе эксплуатации действует на изоляционные свойства и способствует формированию коррозии стали. Помимо этого, водомасляная эмульсия, стекая по стержням 2, накапливается в более холодной зоне ярма, при переходе влаги в масло происходит увлажнение нижней ярмовой изоляции, цилиндров и барьеров и наступает пробой с обмоток на активную сталь магнитопровода, это наиболее тяжелая авария, особенно на крупных силовых трансформаторах с выходом из строя обмоток и магнитопровода [2]⁵.

Структура физико-химических свойств металла

В настоящее время разработки методов поиска диагностических параметров, которые могли бы однозначно определить связь надежности изоляции листов на основе измеренных характеристик при проведении неразрушающих испытаний не дают однозначных результатов. Из этого следует необходимость

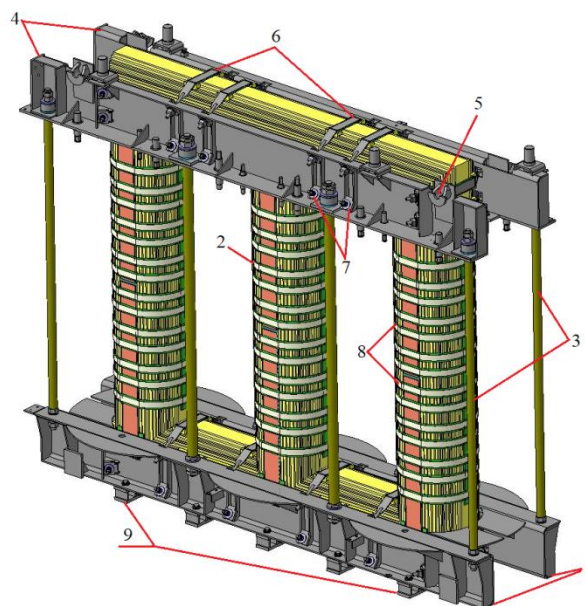


Рисунок 3. Трехфазная магнитная система с прессовкой стержней стеклобандажками, где 1 – нижние ярмовые балки, 2 – стержень магнитопровода, 3 – вертикальные связующие иголки с бумажно-бакелитовыми трубками, 4 – верхние ярмовые балки, 5 – подъемные планки, 6 – полубандажки (стяжки), 7 – винты для прессовки обмоток, 8 – стеклобандажки, 9 – стальные опорные пластины [составлено авторами, программа DesignSpark Mechanical]
Figure 3. Three-phase magnetic system with pressing of rods by glass bandages, where 1 – lower yoke beams, 2 – magnetic core rod, 3 – vertical connecting studs with paper-bakelite tubes, 4 – upper yoke beams, 5 – lifting bars, 6 – half-bandages (ties), 7 – screws for pressing of windings, 8 – glass bandages, 9 – steel support plates [compiled by the authors, DesignSpark Mechanical Programme]

применения оптимально подобранного комплекса методов для контроля и оценки состояния активной части трансформатора как в процессе его сборки, так и во время эксплуатации.

Применение вихретокового контроля для диагностирования магнитопровода трансформаторов позволит определять, эксплуатационный ресурс активной части в процессе его работы, а также состояние стали во время формирования сердечника электрических машин.

Во многих случаях методы неразрушающего контроля используются для обнаружения дефектов структуры, оценки физико-механических свойств изделий после различного рода термических, деформационных или других воздействий в процессе изготовления и эксплуатации. Для точного обнаружения разнообразных дефектов в материалах и изделиях крайне важны методы контроля качества, основанные на анализе изменений физических свойств материала. Эти методы, известные как неразрушающие, помогают выявить дефекты и определить их причины – это ключевой аспект обеспечения высокого качества продукции.

Основой электромагнитных методов контроля качества термической, химико-термической и прочих видов обработок является зависимость магнитных и

⁵ Сергеевков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. – Москва: Высшая школа, 1989. – 352 с. Режим доступа: <https://reallib.org/reader?file=585659&ysclid=ltbi3x7ccy361779745> (дата обращения 25.10.2023).

электрических свойств от изменений структуры металла, которые происходят в процессе этих обработок. Этот взаимосвязанный механизм представляет собой сложную динамику, влияние различных факторов на которую требует детального изучения. Поэтому нет универсального закона, который бы позволял заменить механические и металлографические исследования магнитным или электрическим методом контроля без предварительного анализа конкретного случая. В каждом состоянии и в определенном случае, от состава стали и специфических ее свойств, полученный результат полученных обработок, выбирается соответствующий магнитный или электрический параметр (какая-либо из магнитных проницаемостей μ_n , μ_{max} и др., коэрцитивная сила H_c , намагниченность насыщения M_s , удельное электросопротивление ρ и др.), наиболее легко измеряемый и максимально чувствительный к интересующим нас свойствам изделий.

В зависимости от выбранного параметра, формы и размеров изделия, подлежащего контролю, разрабатывается специализированная аппаратура, которая позволяет быстро и точно оценивать механические и другие эксплуатационные характеристики изделия на основе его магнитных и электрических свойств.

Магнитный структурно-фазовый анализ представляет собой специализированный метод исследования магнитных свойств материалов, который не только позволяет изучить магнитные параметры конкретного изделия или сплава, но также провести оценку его физических характеристик, химического состава и особенностей происходящих в нем физических явлений.

Одним из ключевых аспектов структуры металла являются дефекты кристаллического строения, такие как вакансии, дислокации, дефекты упаковки и незначительные примеси атомов. Необходимо отметить, что введение значительного количества атомов в металл приводит к изменению его состава и не может рассматриваться как дефект структуры, а скорее, как процесс легирования, влияющий на фазовое состояние металла. Значительное влияние на физические свойства металла оказывают внутренние напряжения и границы зерен. Современные модели объясняют это воздействие, рассматривая напряжения и границы зерен как совокупность дефектов в кристаллической структуре. Поэтому, когда мы рассматриваем влияние структуры на свойства, в первую очередь мы имеем в виду зависимость свойств от дефектов строения. К структурным особенностям поликристаллических материалов, которые влияют на их свойства, относятся кристаллическая текстура. Степень ее совершенства или ее отсутствие также оказывают влияние на значения свойств, которые чувствительны к анизотропии кристалла.

Помимо текстуры, обусловленной кристаллической анизотропией, структурно-чувствительные свойства двух- и многофазных сплавов также зависят от распределения фазовых компонентов в пространстве. Таким образом, структурная чувствительность этих

свойств проявляется через влияние кристаллических дефектов и текстуры на них ⁶ [3].

Принцип работы и способ применения метода ВТК

Вихретоковый контроль основан на анализе воздействия внешнего электромагнитного поля на электромагнитное поле, порождаемого вихревыми токами, возникающими в объекте при его воздействии. Площадь и насыщенность вихревых токов зависит от параметров объекта контроля, его геометрической составляющей и электромагнитных характеристик, а также расположением сердечника с электромагнитным полем и объекта контроля (ОК). В данном случае в качестве источника электромагнитного поля выступает индуктивная катушка, через которую пропускается синусоидальный ток. Эта катушка называется вихретоковым преобразователем (рис. 4), где обмотка для приема сигнала (1), обмотка возбуждения (2) и обмотка, применяемая для компенсации влияния обмотки возбуждения (3) размещены в платформе (5), данная платформа позволяет разместить в себе сердечник (4), обмотки пропитаны компаундом (6), с целью защитить их от разрушения при наложении ферритового экрана (7), также датчик помещен в корундовую шайбу (8), которая защищает сердечник (4) от контакта с объектом контроля [4].

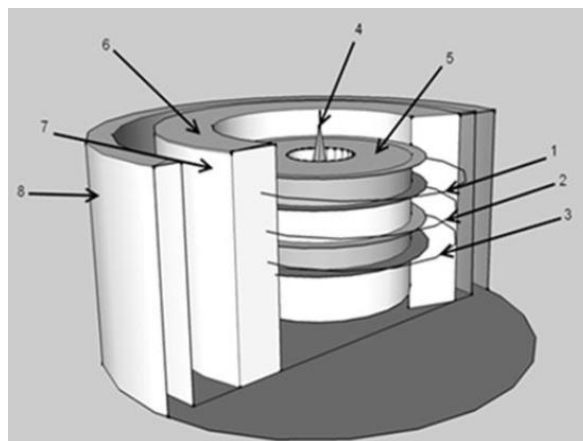


Рисунок 4. Вихретоковый преобразователь [4]
Figure 4. An eddy current transducer [4]

При наличии вблизи ОК такой катушки (рис. 5) от источника генерации в измерительной катушке (С) и прохождении синусоидального сигнала по обмотке возбуждения преобразователя, наводится электромагнитное поле, данное поле наводит электродвижущую силу в измерительной обмотке, эта ЭДС передается на усилитель (У) для увеличения необходимых частот в диапазоне от 2000 до 200000 Гц, частота преобразований, обеспечивает удовлетворительную дискретизацию высокочастотных составляющих, после чего

⁶ Веста. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов. Руководство по эксплуатации. Пермь, 2015. 60 с. Режим доступа: https://dimrus.com/manuals/vesta_um.pdf (дата обращения 05.11.2023).

данные измерения поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), где проходит процедуру перехода в цифровой вид.

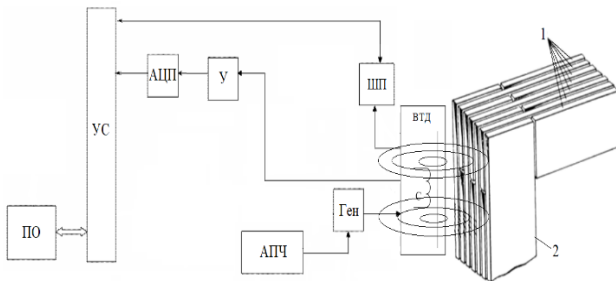


Рисунок 5. Структурная схема вихретокового метода контроля на системе с прямым стыкованием пластин шихтованного магнитопровода: ВТД – вихретоковый датчик, Ген – генератор, ПО – программное обеспечение, У – усилитель, АПЧ – автоматическая подстройка частоты генератора, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ШП – шаговый привод сканирующего устройства, УС – устройство сопряжения, С – измерительная катушка, 1 – ярмо магнитопровода, 2 – стержень [составлено авторами]

Figure 5. Structural scheme of eddy current method of control on the system with direct joining of the plates of the charge-coupled magnetic core: ВТД – eddy current sensor, Ген – generator, ПО – software, У – amplifier, АПЧ – automatic frequency adjustment of the generator, АЦП – analogue-to-digital converter, ШП – stepper drive of the scanning device, УС – interface device, С – measuring coil, 1 – yoke of the magnetic core, 2 – rod [compiled by the authors]

Оцифрованный сигнал обрабатывается на устройстве сопряжения (УС) тем самым происходит отображение результатов в программном обеспечении (ПО), (рис. 6). Шаговый привод сканирующего устройства обеспечивает двухкоординатное перемещение ВТД по заданной траектории, что позволяет производить сканирование ярма (1) или стержня (2) магнитопровода и получать информацию о состоянии поверхностного слоя, запись сканов полезна для контроля динамики развития дефектов, установить область возникновения и ведение архива на протяжении всего срока эксплуатации агрегата. Автоматическая подстройка частоты генератора (АПЧ) дает возможность оператору изменять пределы измерений путем внесения исходных данных о конструкции и материала активной части трансформатора.

Использование матрицы позволяет создавать и сохранять результаты контроля в форме изображения С-скана: визуализации поверхности проверяемого объекта с выделенными дефектами. Энкодер, обычно интегрированный в вихретоковый матричный преобразователь, обеспечивает возможность геопривязки, что позволяет оценить размеры дефектов. Использование записи С-скана является важным инструментом для мониторинга прогресса развития дефектов, оценки производительности дефектоскописта и упрощения процесса документирования контрольных результатов.

Характеристики электродвижущей силы в измерительной катушке будут зависеть от свойств ОК и вза-

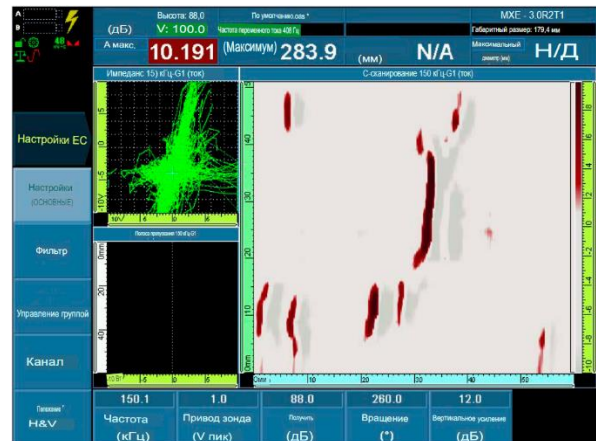


Рисунок 6. Отображение результатов контроля при использовании С-скана активной части трансформатора [составлено авторами]

Figure 6. Display of inspection results when using the C-scan of the transformer core [compiled by authors]

имногорасположения вихретокового преобразователя и ОК. Если объект контроля является немагнитным проводником, электродинамический сигнал будет иметь гармоническую форму и будет характеризоваться амплитудой и фазой. В случае, если объект контроля является ферромагнитным, электродинамический сигнал в измерительной катушке будет зависеть от характера намагничивания объекта, таких как магнитное поле, исходная намагниченность и другие факторы.

Как показано на (рис. 7), плотность вихревых токов j_v достигает максимума под витками обмотки возбуждения [4]. Электрические параметры катушки (параметрический преобразователь) или электродвижущая сила в измерительной обмотке (трансформаторный преобразователь) остаются практически постоянными.

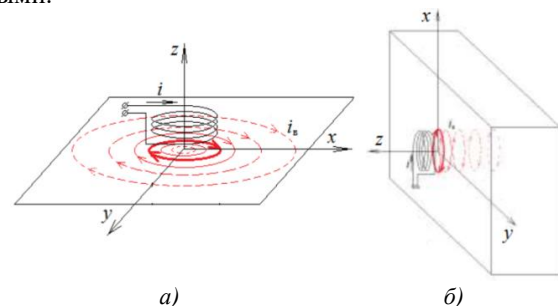


Рисунок 7. Распределение плотности вихревых токов в токопроводящей среде: в поверхностном слое (а); по глубине объекта (б) [4]

Figure 7. Distribution of eddy current density in the conductive medium: in the surface layer (a); along the depth of the object [4]

Учитывая цилиндрическую форму катушек, контуры вихревых токов имеют вид концентрических окружностей. Если катушка с током расположена на поверхности объекта, то максимальная плотность вихревых токов проявляется в контуре, приближенном к контуру самой катушки. В случае появления дефектов (трещин, полостей и т.д.) контур вихревых

токов изменяется, а, следовательно, изменяется и сигнал ВТП.

Контроль ферромагнитных объектов имеет свою особенность – их магнитные свойства сильно влияют на годографы сигналов ВТП. Изменения в магнитных свойствах объекта могут создавать сложности при использовании вихретоковых приборов, но также позволяют контролировать такие характеристики, как твердость, механические напряжения и степень повреждения от усталости. Контроль ферромагнитных и неферромагнитных объектов отличается в том, что годографы сигналов ВТП для ферромагнитных объектов зависят от напряженности поля возбуждения. При контроле ферромагнитных материалов также используются высшие гармоники напряжения ВТП, в качестве информативных параметров сигнала ВТП, так как магнитные характеристики материалов ОК являются нелинейными.

Годограф находится в четвертом квадранте комплексной плоскости и отображает изменение вносимого напряжения для материалов с коэффициентом $\mu=1$. Вносимое напряжение представляет собой изменение напряжения на выводах измерительной обмотки ВТП, вызванное влиянием объекта контроля на его электромагнитное поле (согласно ГОСТ 24289-80). Стрелка на годографе показывает изменение обобщенного параметра β , который связан с повышением удельной электрической проводимости объекта контроля. Годографы стремятся в первый квадрант комплексной плоскости при изменении относительной магнитной проницаемости.

На рисунке 8 представлены годографы для разных значений магнитной проницаемости: $\mu=2$, $\mu=5$ и $\mu \rightarrow \infty$. Направление увеличения μ обозначено стрелкой. Важно отметить, что невозможно провести отдельный контроль электропроводности и магнитной проницаемости материалов, исходя только из изменения амплитуды напряжения измерительной обмотки ВТП. Приняв вектор напряжения a в качестве исходного, то при увеличении удельной электрической проводимости (значение β изменяется с 1,25 до 2,5), амплитуда (длина вектора) значительно увеличивается, в то время как фаза изменяется незначительно (вектор остается в четвертом квадранте комплексной плоскости). При увеличении магнитной проницаемости (значение изменяется с 1 до 2) также наблюдается существенное увеличение амплитуды (новое положение обозначено вектором c).

На то какой сигнал будет формироваться на измерительной катушке (или катушках дифференциального датчика), то есть какова будет амплитуда и фаза колебаний, генерируемых на ней, зависит от нескольких параметров, которые сведены в обобщенный параметр вихретокового контроля, для накладных преобразователей он обозначается чаще всего символом β и описывается формулой (1):

$$\beta = r_{\text{вк}} \sqrt{2\pi f \mu \mu_0 \sigma}, \quad (1)$$

где $r_{\text{вк}}$ – радиус возбуждающей катушки;

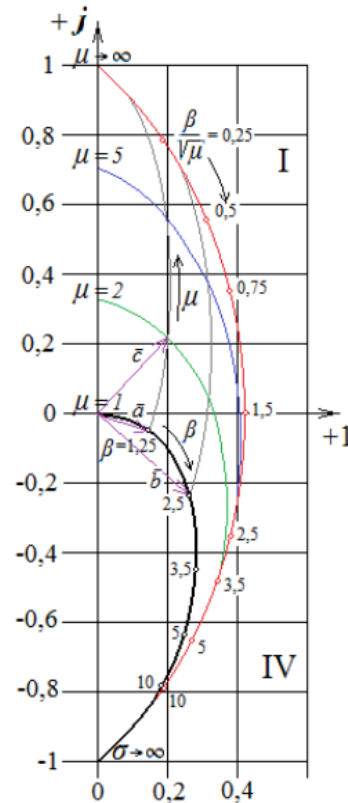


Рисунок 8. Годографы вносимого напряжения накладного ВТП над ферромагнитным материалом [составлено авторами]

Figure 8. Insertion voltage hodographs of superimposed HTP over ferromagnetic material [compiled by the authors]

σ – удельная электрическая проводимость материала объекта;

μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость материала объекта.

При проведении $r_{\text{вк}}$ контроля требуемого параметра в металле, важно учитывать его магнитную проницаемость и удельную электрическую проводимость. Это позволяет подобрать оптимальную частоту возбуждающего тока и радиус преобразователя, чтобы достичь наибольшей чувствительности и минимизировать влияние нежелательных факторов. Проводимость, в свою очередь, является характеристикой способности проводника пропускать электрический ток и обратно пропорциональна его сопротивлению, выражение (2):

$$g = \frac{1}{R}. \quad (2)$$

Проводимость проводника зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления материала, из которого изготовлен проводник, выражение (3):

$$g = \sigma \frac{s}{l}, \quad (3)$$

где, удельная электрическая проводимость материала (обозначаемая как σ) определяется как отношение площади поперечного сечения проводника (обозначаемая как s) к его длине (обозначаемая как l). Важно отметить, что проводимость материала зависит от температуры [5]. Когда металл нагревается, амплиту-

да и частота колебаний атомов в узлах кристаллической решетки увеличиваются. Это, в свою очередь, приводит к увеличению сопротивления движению электронов (или электрическому току) и, как следствие, снижению удельной проводимости материала представленные в таблице 2.

Таблица 2. Электропроводимость металлов [5]
Table 2. Electrical conductivity of metals [5]

Металлы с самой высокой электропроводимостью		Распространенные металлы и сплавы		Металлы и сплавы с самой низкой электропроводимостью	
Металл	σ , МСм/м	Металл	σ , МСм/м	Металл	σ , МСм/м
Медь	58,1	Литая сталь	7,8	Титан	1,96
Алюминий	37	Железо	10	Бронза	1,8
Свинец	4,8	Никель	4,5	Цинк	16,9

Выводы

Вихретоковый контроль обладает рядом преимуществ, включая возможность координации без физи-

ческого контакта между объектом контроля (ОК) и проверяющим устройством (ВТП), что делает его методом бесконтактного контроля. Этот подход позволяет использовать вихретоковый контроль при движении ОК относительно ВТП даже на высоких скоростях, обеспечивая высокую эффективность контроля. Получение первичной информации в виде электрических сигналов без необходимости контакта и с высокой производительностью предоставляет значительные возможности для автоматизации процесса контроля вихретоков.

Одним из дополнительных преимуществ вихретокового контроля является его устойчивость к влажности, давлению и загрязнениям газовой среды, а также радиоактивному излучению и поверхностным загрязнениям непроводящими веществами. Кроме того, конструкция вихретокового контроля проста и надежна. Кагушки вихретокового контроля обычно помещают в защитный корпус, что делает их устойчивыми к механическим и атмосферным воздействиям, и обеспечивает их надежность в качестве первичных преобразователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. Москва: ЭНАС, 2002. 211 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000968074> (дата обращения 18.10.2023).
Alekshev B.A. Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers. Moscow: EHNAS, 2002. 211 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000968074> (accessed: 18.10.2023).
- Антонов Г.В. Ремонт трансформаторов 110 кВ. и выше. Москва: Энергия, 1968. 87 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005946122> (дата обращения 25.10.2023).
Antonov G.V. Repair of transformers 110 kV and above. Moscow: Energia, 1968. 87 p. (In Russ.) Available at: <https://bibliozal.ru/books/biblioteka-elektromontera/bem262-remont-transformatorov-110-kv-i-vyshe.html?ysclid=ltbhygy2312140194> (accessed 25.10.2023).
- Лазарев И.В. Осевые усилия в элементах активной части силового трансформатора при запрессовке обмоток, изменении температуры и влагосодержания изоляционных материалов. *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2014;5:38–43. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=stgwkt> (дата обращения 12.11.2023).
Lazarev I.V. Axial forces in the elements of the active part of a power transformer during pressing of windings, changes in temperature and moisture content of insulating materials. *EHLEKTRO. Ehlektrotehnika, ehlektroehnergetika, ehlektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2014;5:38–43. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=stgwkt> (accessed: 12.11.2023).
- Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. Монография. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 264 с. Режим доступа: https://www.imach.uran.ru/lab/lttd/publ/publ_4.html (дата обращения 14.11.2023).
Shcherbinin V.E., Gorkunov E.S. Magnetic quality control of metals. Monograph. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 1996. 264 s. (In Russ.) Available at: https://www.imach.uran.ru/lab/lttd/publ/publ_4.html (accessed: 11.14.2023).
- Чернев К.К. Мощные трансформаторы. Москва: Энергия, 1978. 120 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/qrw3Y5Awzh3h3?ysclid=ltbigsqrw8358467986> (дата обращения 14.11.2023).
Chernev K.K. Powerful transformers. Moscow: Ehnergiya, 1978. 120 s. (In Russ.) Available at: <https://djvu.online/file/qrw3Y5Awzh3h3?ysclid=ltbigsqrw8358467986> (accessed: 14.11.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Мельников И.В. – обследование и анализ работы силового оборудования, разработка, принятие решений;
Нечитайлов В.В. – практическая ценность и применение методики на производстве;
Бекетов В.Г. – математический анализ, структурная чувствительность физико-механических свойств материалов;
Попова И.Ю. – основные опасные и вредные производственные факторы при эксплуатации оборудования на энергопредприятиях;
Снитко Н.А. – охрана труда и техника безопасности на объектах энергетической отрасли.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Melnikov I.V. – inspection and analysis of the operation of power equipment, development, decision-making;
Nechitailov V.V. – practical value and application of the methodology in production;
Beketov V.G. – mathematical analysis, structural sensitivity of physical and mechanical properties of materials;
Popova I.Yu. – the main dangerous and harmful production factors during the operation of equipment at energy enterprises;
Snitko N.A. – occupational health and safety at energy industry facilities.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Иван Викторович Мельников, оператор электрооборудования энергоблока, Концерн «Росэнергоатом» Ростовская атомная станция Волгодонск-28; старший преподаватель кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8613-9083>

WoS Researcher ID: AHH-5335-2020

e-mail: comosabe@mail.ru

Владимир Владимирович Нечитайлов, старший преподаватель кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6795-2458>

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

Ирина Юрьевна Попова, 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/0009-0005-1314-4091>

e-mail: Lhamo11@mail.ru

Наталья Анатольевна Снитко, старший преподаватель кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3118-3244>

e-mail: NASnitko@mephi.ru

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Ivan V. Melnikov, power unit electrical equipment operator, Rosenergoatom Concern Rostov Nuclear Power Plant Volgodonsk-28; Senior Lecturer, 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/0000-0002-8613-9083>

WoS Researcher ID: AHH-5335-2020

e-mail: comosabe@mail.ru

Vladimir V. Nechitailov, Senior Lecturer, 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/0000-0002-6795-2458>

e-mail: VITikafAE@mephi.ru

Vladimir G. Beketov, Can. Sci. (Engin.), Assistant 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

Irina Yu. Popova, Can. Sci. (Engin.), Assistant 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/0009-0005-1314-4091>

e-mail: Lhamo11@mail.ru

Natalia A. Snitko, Senior Lecturer, 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/0009-0002-3118-3244>

e-mail: NASnitko@mephi.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023

После доработки 01.02.2024

Принята к публикации 08.02.2024

Received 30.11.2023

Revision 01.02.2024

Accepted 08.02.2024

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

УДК 621.311.25:621.64

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-07>

EDN JFQRZB

Оригинальная статья / Original paper



Современные подходы к определению нормируемых параметров
вибрационного состояния паропроводов атомных станций


С.Б. Кравец¹ , С.А. Кузин^{2,3}  , А.Ю. Смолин³ 

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 – филиал Национального исследовательского ядерного университета

«МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

 KuzinSergey55@mail.ru

Аннотация. В процессе эксплуатации паропроводов на атомных станциях основными повреждающими факторами являются не только коррозия и эрозия, приводящие к утончению стенки трубы, но и усталостные повреждения, возникающие как из-за температурных усилий самокомпенсации, так и вследствие высокой вибрационной нагрузки. Как показывает практика, наиболее перспективным направлением обеспечения вибростойкости паропроводов в настоящее время является расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов при вибрационном нагружении. В данной работе определена прочность наиболее применяемых типоразмеров стальных трубопроводов при воздействии вибрационных нагрузок в соответствии с ГОСТ Р 59115.9-2021. Для принятых в рассмотрение 4-х вариантов расчетных схем были определены амплитуды условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений. Определена допустимая амплитуда напряжений из условия эксплуатации 60 лет. Показано, что для трубы, изготовленной из 12X18H10T, допустимая амплитуда напряжений для расчетной температуры $t = 350^\circ\text{C}$ составит не более 46,4 Мпа. Применительно к трубопроводам атомных станций нормируемые параметры вибрации в нормативной документации не были установлены до 2022 г., когда для трубопроводов атомных станций в ГОСТ Р 59115.11-2021 были приняты следующие предельные значения виброскорости, не требующие выполнение проверки вибропрочности: v_{max} до 15 мм/с, $v_{\text{свк}}$ до 7 мм/с. Таким образом, в настоящее время в российской нормативной документации на трубопроводы отсутствуют нормируемые значения параметров вибрации (как правило виброскорости), выбираемые в зависимости от частоты вибрационного воздействия. Предлагается разработать и внести в нормативную документацию частотно-зависимые критерии предельных параметров вибрации для трубопроводов атомных станций, уточненные в соответствии с реальными условиями работы данных трубопроводов.

Ключевые слова: паропроводы, трубопроводы атомных станций, вибронапряжения, виброперемещения, эксплуатационные режимы, расчетная температура, допустимая амплитуда напряжений.

Для цитирования: Кравец С.Б., Кузин С.А., Смолин А.Ю. Современные подходы к определению нормируемых параметров вибрационного состояния паропроводов атомных станций. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):52–57. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-07>

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


Modern approaches to determining the standardised parameters of vibration state of NPP
steam pipelines

Sergey B. Kravets¹ , Sergey A. Kuzin^{2,3}  , Aleksandr Yu. Smolin³ 

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

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

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

 KuzinSergey55@mail.ru

Abstract. During the operation of NPP steam pipelines the main damaging factors are not only corrosion and erosion leading to thinning of the pipe wall but also fatigue damage resulting not only from temperature self-compensation efforts, but also high vibration load. As practice shows, the most promising direction of ensuring the vibration resistance of steam pipelines at present is the computational and experimental study of the stress-strain state of pipelines under vibration loading. This work shows that the strength of the

most commonly used standard sizes of steel pipelines under the influence of vibration loads is determined in accordance with Russian State Standard R 59115.9-2021. Taking into account the stress concentration, the amplitudes of the conditional elastic reduced stresses were determined for the 4 variants of the calculation schemes accepted for consideration. The permissible amplitude of stresses from an operating condition of 60 years is determined. It is shown that the permissible voltage amplitude for the design temperature $t = 350^{\circ}\text{C}$ will be no more than 46.4 Mpa for a pipe made of 12X18H10T. As for NPP pipelines, the normalized vibration parameters in the regulatory documentation were not established until 2022, when the following vibration velocity limits were adopted for pipelines of nuclear power plants in Russian State Standard R 59115.11-2021, vibration resistance testing is not required: v_{max} up to 15 mm/s, v_{msv} up to 7 mm/s. Thus, currently in the Russian regulatory documentation there are no normalized values of vibration parameters (as a rule, vibration velocity) for pipelines selected depending on the frequency of vibration exposure. It is proposed to develop and introduce into the regulatory documentation frequency-dependent criteria for limiting vibration parameters of NPP pipelines, specified in accordance with the actual operating conditions of these pipelines.

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

Введение

В процессе эксплуатации паропроводов на атомных станциях (далее – АС) основными повреждающими факторами являются не только коррозия и эрозия, приводящие к утонению стенки трубы, но и усталостные повреждения, возникающие вследствие не только температурных усилий самокомпенсации, но и высокой вибрационной нагрузки. К сожалению, вопросы определения нормируемых параметров вибрационного состояния трубопроводов в отечественной нормативной документации практически не отражены, что вызвано в первую очередь большим разнообразием конструкций паропроводов и различием подходов к определению напряженно-деформированного состояния паропроводов при вибрационном нагружении.

Как показывает практика, наиболее перспективным направлением обеспечения вибростойкости паропроводов в настоящее время является расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов при вибрационном нагружении.

В РФ первые нормируемые параметры вибрации трубопроводов пара и горячей воды были установлены в РД-10-249-98¹, согласно которому, для определения вибрационного состояния трубопровода необходимо определить точки трубопровода с максимальными значениями виброскорости, в которых производятся измерения максимальных скоростей v_{max} , сравниваемых с нормируемыми значениями виброскорости – v . Нормируемые значения в РД-10-249-98 установлены следующим образом:

– при значениях v_{max} до 15 мм/с не требуется проверки вибропрочности;

– при значениях $v_{\text{max}} = 15\text{--}25$ мм/с требуется расчетная проверка на основании подробных измерений (с определением спектров виброскоростей);

– при значениях v_{max} свыше 25 мм/с принимаются меры для снижения вибрации.

Применительно к трубопроводам АС нормируемые параметры вибрации в нормативной документации не были установлены до 2022 г., когда для трубопроводов атомных энергетических установок в ГОСТ Р 59115.11-2021² были приняты следующие предельные значения виброскорости, не требуется выполнение проверки вибропрочности: v_{max} до 15 мм/с, $v_{\text{скз}}$ до 7 мм/с.

Таким образом, в настоящее время в российской нормативной документации на трубопроводы отсутствуют нормируемые значения параметров вибрации (как правило, виброскорости), выбираемые в зависимости от частоты вибрационного воздействия.

Для реальных условий частотные характеристики вибрационного воздействия играют важную роль, так как именно низкочастотные колебания обладают наибольшей механической энергией. Зависимость уровня механических воздействий среды на стенки трубопровода от вынужденной частоты воздействия, обусловленной гидродинамическими силами турбулентного потока, рассмотренная в Рекомендациях для предотвращения вибрационного усталостного разрушения трубопроводов³, приведена на рисунке 1. Как видно, наибольший уровень кинетической энергии потока, воздействующий на трубопровод, сосредоточен в диапазоне до 10 Гц. Таким образом, очевидно, что нормирование значения параметров вибрации без учета частоты вибрационного воздействия, является избыточно консервативным.

Рассмотрим подходы к определению нормируемых параметров вибрационного состояния трубопроводов, применяемых в мировой практике.

² ГОСТ Р 59115.11-2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на постпроектных стадиях. – Москва: Российский институт стандартов, 2021. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75973/> (дата обращения: 09.11.2023).

³ Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework. 2nd Edition. Energy Institute. London, 2008. – Режим доступа: <https://dokumen.tips/documents/guidelines-for-the-avoidance-of-vibration-induced-fatigue-failure-in-process.html> (дата обращения: 13.11.2023).

¹ РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. Постановление Госгортехнадзора РФ от 25.08.1998 №50 (ред. от 13.07.2001). – Москва: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2001. – 244 с. – Режим доступа: <https://tk-servis.ru/lib/637/> (дата обращения: 09.11.2023).

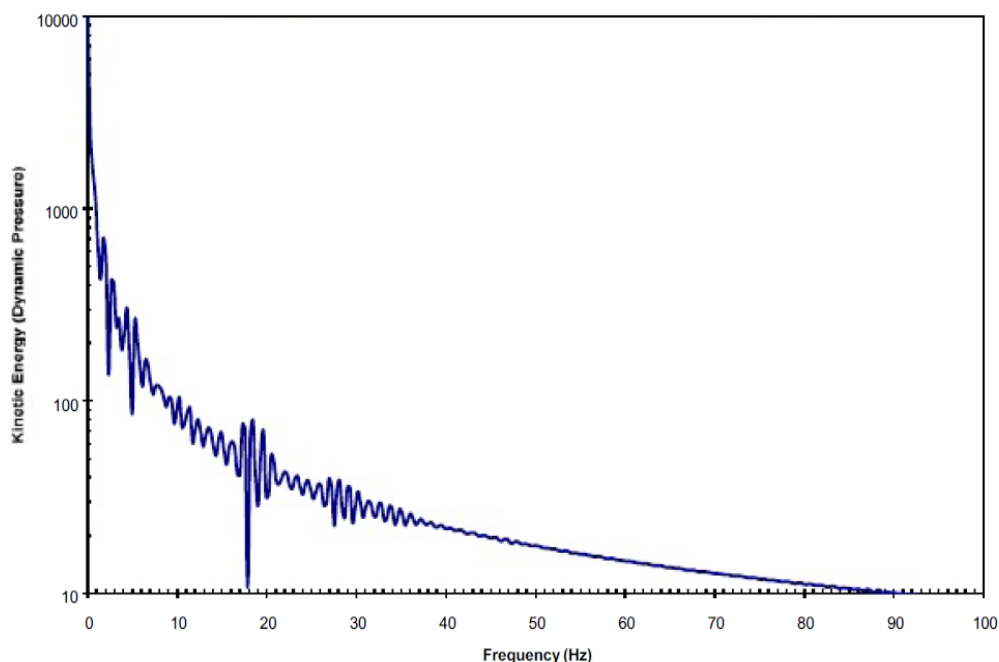


Рисунок 1. Зависимость уровня возбуждения трубопровода от вынуждающей частоты воздействия турбулентного потока среды ³ [3]

Figure 1. Dependence of pipeline excitation level on forcing frequency of turbulent medium flow ³ [3]

Одним из первых документов, в котором предложены частотно-зависимые критерии предельных параметров вибрации $v_{скз}$, был VDI 3842 ⁴. Частотно-зависимые критерии $v_{скз}$ представлены на рисунке 2.

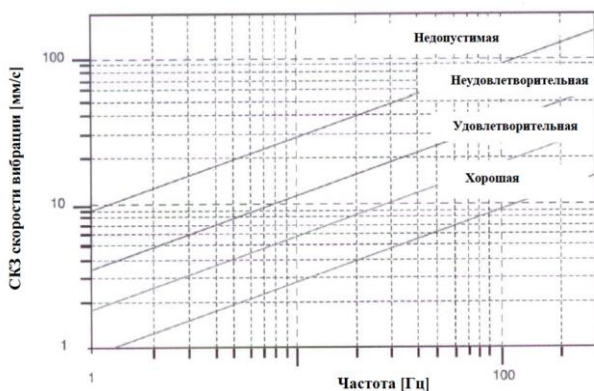


Рисунок 2. Частотно-зависимый критерий $v_{скз}$ (по VDI 3842) ⁴

Figure 2. Frequency-dependent n_{msv} criterion (according to VDI 3842) ⁴

В Правилах ASME ⁵, посвященных технологическим трубопроводам, учет вибрационного воздей-

ствия предлагают выполнять с учетом «Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework». Частотно-зависимые критерии предельные параметры вибрации, согласно «Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework», представлены на рисунке 3. Согласно «Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework», если уровень вибрации превышает критерий «Problem (Проблема)», то существует высокий риск возникновения усталостного повреждения. В этом случае следует немедленно принять меры по контролю вибрации и/или немедленно провести прямое измерение динамической деформации, чтобы точно определить вероятность отказа. Проверки следует проводить немедленно на соответствующих сварных швах неразрушающим способом, чтобы гарантировать, что усталостные трещины не возникнут. Уровень вибрации, превышающий критерий «Concern (Обеспокоенность)» на рисунке 3, означает, что существует вероятность возникновения усталостного повреждения. В этом случае следует принять меры по контролю вибрации и/или провести прямое измерение динамической деформации, чтобы точно определить вероятность отказа. Проверки соответствующих сварных швов должны выполняться неразрушающим способом, чтобы убедиться в отсутствии усталостных трещин.

⁴ VDI 3842. Vibrations in piping systems. Verein Deutscher Ingenieure, 2004. 87 p. – Режим доступа: <https://standards.globalspec.com/std/18809/VDI203842> (дата обращения: 13.11.2023).

⁵ ASME B31.3-2016. Сборник правил ASME для трубопроводов, работающих под давлением (Системы технологических трубопроводов). – Режим доступа:

<https://www.engineerdocuments.com/standards/ASME-B31-3-2016/> (дата обращения: 09.11.2023).

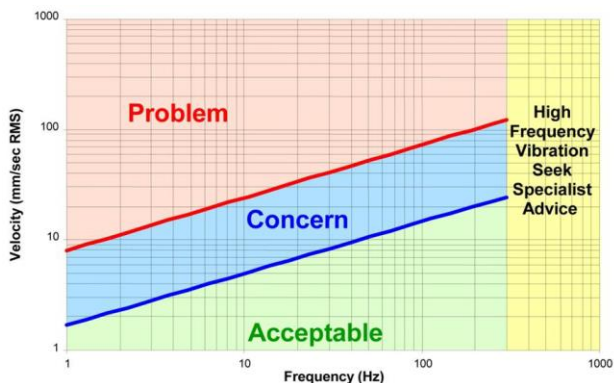


Рисунок 3. Частотно-зависимый критерий $v_{кр}$ [Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework]

Figure 3. Frequency-dependent n_{msv} criterion [Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework]

Для оценки уровня напряжений, возникающих в элементах трубопровода при вибрационном воздействии, рассмотрим максимально возможные изгибные напряжения для расчетной схемы, приведенной на рисунке 4. В рассмотрение была принята схема, так как наибольший уровень изгибных напряжений, возникающих в трубопроводе, будет для схемы с жесткой заделкой.

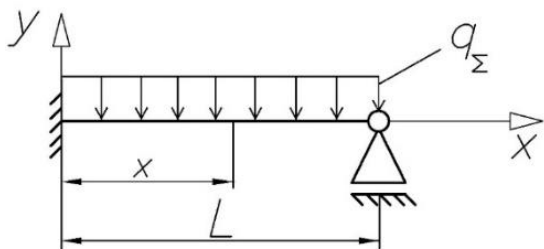


Рисунок 4. Расчетная схема участка трубопровода [составлено авторами]

Figure 4. Calculation diagram of the pipeline section [compiled by the authors]

Принимая во внимание информацию, приведенную на рисунке 1, согласно которой с уменьшением жесткости трубопроводной системы, растут механические нагрузки от гидродинамических воздействий, выберем для указанной схемы максимальные значения из регламентированных в нормативной документации расстояний между опорами. Предельные (максимальные) расстояния между опорами трубопроводов выбраны в соответствии с авторитетными источниками [1–4].

Расчет собственных частот участка трубопроводной системы проводился аналитическим способом с использованием следующих исходных данных: трубопровод заполнен жидкостью с плотностью $\rho=1000$ кг/м³; покрыт тепловой изоляцией толщиной 50 мм, выполненной из материала с плотностью $\rho=200$ кг/м³. Результаты расчета собственных частот приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения первых собственных частот [составлено авторами]

Table 1. Values of the first natural frequencies [compiled by the authors]

№	Типоразмер, $D_{нар} \times S_{ст}$, мм	Длина пролета, м	Масса пролета, кг	Первая (низшая) собственная частота, Гц
1	57x3,5	4,0	39,7	10,3
2	76x3,0	4,0	52,8	13,0
3	89x3,5	5,0	85,1	10,0
4	108x3,5	5,5	121,0	9,8

Как видно из представленных в таблице 1 результатов, минимальное значение первой собственной частоты составляет приблизительно 10 Гц. Определим значение изгибных напряжений, возникающих в трубопроводе при нормированном согласно ГОСТ Р 59115.11-2021 максимальном значении виброскорости $v_{max} = 15$ мм/с.

Значение виброперемещений для гармонических колебаний можно определить по формуле (1):

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

где S – виброперемещение, мкм;

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

f – частота, Гц.

Значения номинальных изгибных напряжений, возникающих в месте заделки при смещении точки максимального прогиба трубопровода, соответствующей первой форме колебаний, на расстояние S , для расчетной схемы, приведенной на рисунке 4, определялись при помощи расчетного комплекса «Зенит-95»⁶, использующего МКЭ.

Определение значений изгибных напряжений в месте заделки трубопровода проводилось в следующем порядке. На первой стадии выполнения расчета вводились геометрические размеры элемента трубопровода (длина участка), затем характеристики его поперечного сечения, весовые параметры (размер поперечного сечения трубы; масса теплоизоляции и среды, учитываемая пересчетом плотности материала трубопровода) и условия закрепления. Для полученной расчетной модели выполнялась оценка ее соответствия теоретической (эталонной) модели, использованной для определения первых собственных частот (см. табл. 1). В качестве критерия соответствия модели, разработанной при помощи расчетного комплекса «Зенит-95», аналитической модели, было выбрано значение собственной частоты колебаний конструкции, которая наиболее точно характеризует жесткость конструкции. Расчеты первых (низших) пяти собственных частот и форм колебаний выпол-

⁶ Зенит-95. Программа расчета динамики и прочности конструкций, механизмов и приводов методом конечных элементов (МКЭ). – Режим доступа: <https://ntp-dip.ru/> (дата обращения: 09.11.2023).

нялся методом МКЭ. Предельным значением критерия соответствия моделей было принята разница собственных частот 5 %.

После проведения верификации модели выполнялась оценка напряженно-деформированного состояния трубопровода. Расчет напряжений выполнялся методом динамического анализа, где в качестве нагрузки были использованы значения виброперемещений точки максимального прогиба трубопровода, определенного для первой собственной форме колебаний участка трубопровода в вертикальной плоскости.

Кроме того, с использованием расчетного комплекса «Зенит-95» статическим методом были определены величина прогиба участка трубопровода, вызванная его весом, и соответствующие напряжения, вызванные весовыми нагрузками. Результаты расчета приведены в таблице 2, анализ данных показывает, что значения напряжений и прогибов, вызванных весовыми нагрузками, существенно превышают значения виброперемещений и вызываемых ими напряжений. Следовательно, максимальные значения виброперемещений не превысят 30 % от перемещений, вызванных весовыми нагрузками.

Таблица 2. Значения прогибов и напряжений [составлено авторами]

Table 2. Deflection and stress values [compiled by the authors]

№	Типоразмер $D_{нар} \times S_{ст}$, мм	Виброперемещение мм	Напряжение от вибрации, Мпа,	Прогиб от веса, мм	Напряжение от веса, Мпа,
1	57x3,5	0,66	5,9	2,95	26,4
2	76x3,0	0,52	6,0	1,86	21,4
3	89x3,5	0,68	5,9	3,13	27,0
4	108x3,5	0,69	6,0	3,23	28,0

Для получения более полной картины вибрационного состояния трубопроводов в целом рассмотрим требования к вибростойкости специальной трубопроводной арматуры, установленные в НП-068-05⁷.

Согласно п. 2.3.22 НП-068-05 «Вновь разрабатываемая арматура и комплектующие устройства должны быть вибростойки в диапазоне частот от 5 до 100 Гц при действии вибрационных нагрузок по двум направлениям с ускорением до 0,1 g и с амплитудой колебаний до 50 мкм, причем одно из направлений воздействия совпадает с осью трубопровода». Таким образом, предельные значения вибрационных нагрузок на трубопроводную арматуру, установленные в НП-068-05 «Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования», могут быть превышены при предельных значениях параметров вибрации, установленных в ГОСТ Р 59115.11-2021, так как для низкочастотной вибрации уровень вибра-

ционных воздействий, согласно данных таблицы 2, может составить: виброускорение 0,3 g (0,1 g – НП-068-05), а виброперемещение 700 мкм (50 мкм – НП-068-05). Следовательно, при установке трубопроводной арматуры в трубопроводную систему, необходимо выполнять обязательную проверку прочности трубопровода в целом при воздействии вибрационных нагрузок.

Определение циклической прочности трубопроводов при воздействии вибрационных нагрузок проводилось в соответствии с ГОСТ Р 59115.9-2021⁸. Для принятых в рассмотрение 4-х вариантов расчетных схем были определены амплитуды условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений (σ_{aF}). Для определения коэффициентов концентрации с помощью расчетного комплекса «Зенит-95» были созданы расчетные модели тройниковых узлов, отражающие их реальные размеры. Максимальное значение (σ_{aF}) для рассмотренных четырех типоразмеров составило 13,4 Мпа. Принимая во внимание, что за 60 лет количество циклов колебаний с частотой 10 Гц составит $1,9 \cdot 10^{10}$ (в запас прочности принимается, что трубопровод работает без остановов) определим допускаемую амплитуду напряжений (σ_{aF}), получаемую для данного числа циклов. Для трубы, изготовленной из 12X18H10T, допускаемая амплитуда напряжений для расчетной температуры $t = 350^\circ\text{C}$ составит (σ_{aF}) = 46,4 Мпа.

Как видно из представленных выше результатов оценки циклической прочности участка трубопровода при нормируемом значении вибрационного воздействия $v_{max} = 15$ мм/с, повреждаемость трубопровода в узле приварки к оборудованию (коллектору) не превысит 25% за срок непрерывной эксплуатации 60 лет.

Выводы

Применение нормированного и не зависящего от частоты воздействия значение виброскорости $v_{max} = 15$ мм/с, установленного ГОСТ Р 59115.11-2021, для трубопроводов АС, спроектированных в соответствии с положениями нормативной документации, выдержки из которой приведены в Справочнике по трубопроводам тепловых электростанций [1], не отвечает современному уровню развития науки и техники и обладает излишним консервативным запасом.

Предлагается разработать и внести в нормативную документацию частотно-зависимые критерии предельных параметров вибрации для трубопроводов АС, уточненные в соответствии с реальными условиями работы данных трубопроводов.

⁷ НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2005. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200044037> (дата обращения: 09.11.2023)

⁸ ГОСТ Р 59115.9 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Повторный расчет на прочность. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2022. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200182238> (дата обращения: 09.11.2023)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Никитина И.К. Справочник по трубопроводам тепловых электростанций. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 176 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/yJRf0ObrMjXMo> (дата обращения: 11.11.2024).
Nikitina I.K. Handbook on pipelines of thermal power plants. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 176 p. (In Russ.) [Available at: https://djvu.online/file/yJRf0ObrMjXMo](https://djvu.online/file/yJRf0ObrMjXMo) (accessed: 11.11.2024).
2. Горюнов О.В., Слоvtцов С.В. Расчетно-экспериментальное обоснование вибропрочности трубопроводов АЭС на основе квазистатического подхода. *Надежность и безопасность энергетики*. 2017;10(4):304–309. Режим доступа: <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-304-309> (дата обращения: 15.02.2024).
3. Кравец С.Б. Оценка сейсмостойкости технологических систем атомных станций. Диссертация доктора технических наук по специальности 05.04.11. Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения. Москва, 2005. 254 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004271016> (дата обращения: 15.02.2024).
Kravets S.B. Assessment of seismic resistance of technological systems of nuclear power plants. Dissertation. Moscow, 2005. 254 p. (In Russ). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004271016> (accessed: 15.02.2024).
4. Slovtsov S.V., Soldatov A.S., Goriunov O.V., Sinilshchikov A.E., Leschenko A.Yu., Osipov Yu.V. Measurement of vibration parameters of SIS pipelines reactor based on RBMK-1000 at 1-st block Smolenskaya NPP. *Testing. Diagnostics*. 2017;8:44–50. <https://doi.org/10.14489/td.2017.08.pp.044-050>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кравец С.Б. – анализ результатов расчетов и разработка рекомендаций;
Кузин С.А. – проведение расчетов паропроводов;
Смолин А.Ю. – разработка рекомендаций.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

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

Сергей Алексеевич Кузин, ведущий конструктор, АО «Атоммашэкспорт»; 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/0000-0002-7384-5827>

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Александр Юрьевич Смолин, 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/0000-0002-0148-2086>

e-mail: AYSmolin@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kravets S.B. – analyzing the results of calculations and developing recommendations;
Kuzin S.A. – steam line calculations;
Smolin A.Yu. – developing recommendations.

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey B. Kravets, Head of Reliability and Quality Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Sergey A. Kuzin, leading designer, JSC Atommasheport; Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic 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

Aleksandr Yu. Smolin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

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

e-mail: AYSmolin@mephi.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023

После доработки 15.02.2024

Принята к публикации 22.02.2024

Received 04.12.2023

Revision 15.02.2024

Accepted 22.02.2024

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.56




<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-08>

EDN JFRMGR

Оригинальная статья / Original paper




**Методика конверсии исследовательских ядерных реакторов
на этапе вывода из эксплуатации**

Д.Ю. Байдаров¹, Т.В. Бойкова²  , Ю.О. Кочнов² ,
Н.Н. Сафронова³, И.А. Тутнов²

¹ ГК «Росатом», г. Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

³ Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли (АСКАО), Москва, Российская Федерация

 Boykova_TV@nrcki.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема формирования научно-технических программ конверсии исследовательских ядерных установок на этапе вывода из эксплуатации, возникшая в аспекте обоснования возможности продления назначенного срока эксплуатации всех действующих исследовательских ядерных реакторов в России. Для решения данной проблемы предлагается методика, в состав которой входит информационная модель и процессное описание необходимых пошаговых действий, а также свод приложений в виде документов, обосновывающих наиболее оптимальные пути формирования проекта управления качеством процессов конверсии ИЯУ применительно к особым условиям жизненного цикла конкретных ядерных реакторов. Описывается общий вид методики: принципы и методы построения, структура. Приводится пример применения данной методики при конверсии исследовательского солевого растворного импульсного исследовательского реактора «Гидра» для этапа вывода из эксплуатации. Целью конверсии реактора «Гидра» является продление назначенного срока эксплуатации путем замены невосстанавливаемого оборудования – корпуса. Сформулированы основные критерии обоснования остаточного ресурса корпуса, которыми являются наличие запаса прочности материала корпуса с учетом набранного флюенса на более уязвимые участки и обоснование целостности и герметичности корпуса. Для наглядности концептуальная информационная модель обоснования безопасности процесса замены корпуса реактора «Гидра» представлена в виде диаграммы Исикавы. Методика представляет собой проведение ряда последовательных научно-технических мероприятий, исследований и конечное число поэтапных действий для достижения конечной цели – продления срока эксплуатации. Описываются этапы методики обоснования безопасности замены корпуса реактора «Гидра» такие, как «уточнение исходных данных», «выполнение расчетных исследований и лабораторных экспериментов», «уточнение требований методической документации» и «формирование плана работ» и «оформление лицензионных документов на эксплуатацию».

Ключевые слова: Методика, исследовательский ядерный реактор, вывод из эксплуатации, ремонт, конверсия, остаточный ресурс, проектный срок эксплуатации, реактор «Гидра», импульсный ядерный реактор, замена корпуса реактора.

Для цитирования: Байдаров Д.Ю., Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Сафронова Н.Н., Тутнов И.А. Методика конверсии исследовательских ядерных реакторов на этапе вывода из эксплуатации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):58-67 <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-08>

For citation: Baidarov D.Yu., Boykova T.V., Kochnov Yu.O., Safronova N.N., Tutnov I.A. The method of research nuclear installation conversion at the decommissioning stage. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):58-67 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-08>


The method of research nuclear installation conversion at the decommissioning stage

Dmitriy Yu. Baidarov¹, Tatyana V. Boykova²  , Yuriy O. Kochnov² ,
Nataliya N. Safronova³, Igor A. Tutnov²

¹ Rosatom State Corporation, Moscow, Russian Federation

² National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

³ Association of Nuclear Industry Construction Organisations (ASCAO), Moscow, Russian Federation

 Boykova_TV@nrcki.ru

Abstract. The article examines the problem of forming scientific and technical programs for the conversion of research nuclear installations at the decommissioning stage, which arose in the aspect of justifying the possibility of extending the designated service life of all existing research nuclear reactors in Russia. To solve this problem, a methodology is proposed, which includes an information model and a process description of the necessary step-by-step actions, as well as a set of appendices in the form of documents justifying the most optimal ways to form a project for managing the quality of nuclear reactor conversion processes in relation to

special life cycle conditions of specific nuclear reactors. The general view of the methodology is described: principles and methods of construction, structure. An example of the application of this technique in the conversion of the Hydra salt solution pulsed research reactor for the decommissioning stage is given. The purpose of the conversion of the Hydra reactor is to extend the designated service life by replacing non-repairable equipment the vessel. The main criteria for justifying the residual life of the housing are formulated, which are the presence of a safety margin of the housing material, taking into account the accumulated fluence on more vulnerable areas and the justification of the integrity and tightness of the housing. For clarity, the conceptual information model of the methodology for justifying the safety of the process of replacing the Hydra reactor vessel is presented in the form of an Ishikawa diagram. The methodology represents a series of sequential scientific and technical activities, research and a finite number of step-by-step actions to achieve the final goal – extending the service life. The stages of the methodology for justifying the safety of replacing the Hydra reactor vessel are described, such as «clarification of initial data», «performing computational studies and laboratory experiments», «clarification of the requirements of methodological documentation» and «formation of a work plan» and «registration of licensing documents for operation».

Keywords: Methodology, research nuclear reactor, decommissioning, repair, conversion, residual life, design life, Hydra reactor, pulsed nuclear reactor, reactor vessel replacement.

Введение

Исследовательские ядерные установки (далее – ИЯУ) для проведения научных экспериментов в области использования атомной энергии в своем большинстве представлены уникальными ядерными реакторами, различного типа с относительно малой установленной мощностью¹. На длительном жизненном цикле ИЯУ с момента их пуска в эксплуатацию выполняются работы, связанные с реализацией научно-технических программ различных исследований и одновременно работы, направленные на расширение экспериментальных возможностей, улучшения уровня безопасности [1,2] таких установок, повышения их экологической приемлемости и эффективности.

Большинство ИЯУ были спроектированы и созданы в 60-70-х гг. прошлого века. Тогда в их проектах не было уделено достаточного внимания вопросам безопасности и противоаварийной устойчивости ядерных реакторов при длительной эксплуатации. В частности, таким важным вопросам, как обоснование рисков эксплуатации [1]; проектирования и верификации методов мониторинга технического состояния; обоснования и определения остаточного ресурса реактора, его незаменимых конструкций; выявления факторов опасностей; обоснование приемлемости рисков безопасности для процессов эксплуатации и ремонта заменяемого оборудования реактора, выработавшего свой ресурс; безопасности и экологической приемлемости обращения с облученным ядерным топливом и радиоактивными отходами; формирование программы управления качеством эксплуатации и вывода ИЯУ из эксплуатации; другим.

К текущему моменту подавляющее большинство ИЯУ исчерпали свой ресурс и должны быть подвергнуты процедуре конверсии [1,3], в аспекте обоснования возможности продления их проектного срока службы, проведения капитального ремонта или реконструкции, либо замены на новые установки.

За долгий период эксплуатации ИЯУ требования нормативных документов по обеспечению безопасности при эксплуатации исследовательских реакторов неоднократно менялись в сторону ужесточения. Для удовлетворения строгих требований современных нормативных документов регулятора и получения новых лицензионных разрешений для использования ИЯУ за пределами проектного ресурса, а также, для прогнозирования поведения ядерного реактора в штатных и в аварийных ситуациях, обоснования достаточности различных систем безопасности и вспомогательного оборудования, устройств для превентивного предупреждения возможных аварий, со всей очевидностью, необходимо на проектно-целевой основе выполнить формирование научно-технических программ конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации.

Учитывая широкий круг задач, стоящих перед ГК «Росатом» [3], становится важным объединение усилия множества научных и проектных организаций, заводов изготовителей ядерной техники в едином векторе развития и конверсии ИЯУ. Вместе с этим в общей системе проектирования, создания и эксплуатации ИЯУ образовалось большое количество вертикальных и горизонтальных связей функционального и информационного характера. Поэтому задача анализа сложившихся отношений, наведения в них системного порядка, подчинения деятельности всех элементов жизненного цикла ИЯУ единой цели – эффективности и безопасности, экологической приемлемости таких установок, является чрезвычайно актуальной научно-практической проблемой текущего момента, требующей неотложного решения. Необходимость разработки в едином формате научно-технических программ конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации вызвана стремлением: научно обосновать систему исследовательских экспериментальных задач ГК «Росатом» и как следствие, повысить эффективность НИР и ОКР; исключить дублирование многих научно-исследовательских и конструкторских разработок; исключить переориентирование финансирования, выделяемого на НИОКР; повысить эффективность реализации научных достижений и передовых инженерных решений в новых разработках; исключить необоснованное расширение номенклатуры проектов ИЯУ при недостаточной их стандартизации и унификации. Таким образом, определяется актуальность

¹ Калыгин В.В., Гремячкин В.А., Святкин М.Н. [и др. Опыт эксплуатации комплекса исследовательских реакторов ГНЦ РФ НИИЯР. – XII ежегодная Международная научно-техническая конференция Ядерного общества в России «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии»: Сборник докладов. – Дмитровград: ФГУП ГНЦ РФ НИИЯР, 2001. – Т. 1. – С.49–70.

разработки и верификации методики формирования научно-технических программ конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации, которая будет инвариантной к проектным особенностям и условиям практического использования конкретного исследовательского ядерного реактора, в т.ч. и реакторов, важных для решения актуальных проблем получения полезных изотопов и специальных медицинских препаратов.

Научные положения, принципы и методы решения проблемы конверсии ИЯУ

Разработка методики формирования научно-технических программ конверсии ИЯУ основывалась на использовании методологии и рекомендаций программно-целевого метода [2,3]. Однако, программно-целевой метод лишен универсальности и в общем случае процессы главные и вспомогательные, алгоритмы и процедуры метода не могут быть разработаны и определены таким образом, чтобы их можно было применить для решения любой задачи на проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации ИЯУ, ввиду индивидуальной оригинальности и специфики последних. Поэтому, целью разработки названной методики в нашем случае ставится формирование общих процессов, процедур, приемов и документированного порядка формирования целевых научно-технических программ конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации, для общего случая в удобной форме проекта управления качеством процессов конверсии ядерной техники. Разработка методики формирования научно-технических программ конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации (далее – Методика) в целом должна завершаться выпуском программной документации, в состав которой входит информационная модель и процессное описание необходимых пошаговых действий, а также свод приложений в виде документов, обосновывающих наиболее оптимальные пути формирования проекта управления качеством процессов конверсии ИЯУ применительно к особым условиям жизненного цикла конкретных установок.

Основные пошаговые действия Методики состоят из: поиска и анализа информационных материалов и сведений о жизненном цикле ИЯУ; постановки целей и задач программы управления качеством процессов конверсии ИЯУ (далее – Конверсии); организации и проведения НИОКР по решению функциональных задач Конверсии; ресурсного обеспечения практических работ Конверсии; применения организационно-экономических механизмов реализации Конверсии; способов организационного управления (самооценки и аудита качества) в период реализации программы Конверсии. В основе настоящей Методики использована общепринятая логическая схема программно-целевого метода: «цели программы – пути достижения программных целей – средства, необходимые для практической реализации программы» [4]. Согласно данной схеме, программные цели Конверсии ИЯУ должны быть реализованы в рамках системы НИОКР с предоставлением необходимых инструментов и

ресурсов, в т.ч. инженерных и интеллектуальных. При этом программа Конверсии должна обладать следующими характеристиками:

- системность, характеризующаяся наличием плана реализации скоординированных и взаимосвязанных исследований в целях конверсии ИЯУ;
- ориентация на потребности ГК «Росатом», определяемая тенденцией выполнения НИОКР для достижения поставленной задачи в рамках проблемы конверсии ИЯУ;
- комплексность и интеграции разнообразных научных подходов и методов, обеспечивающих решение программной проблемы конверсии ИЯУ;
- достаточное обеспечение необходимыми ресурсами в рамках программы Конверсии ИЯУ в интересах ГК «Росатом».

Для общего случая информационную модель Методики поясняет рисунок 1.

В основе предлагаемой Методики лежат апробируемые практикой принципы:

- Целеустремленность. В соответствии с этим принципом формирование научно-технических программ конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации должна иметь направленность на достижение генеральной цели деятельности ГК «Росатом», решение задач, определенных на основе долгосрочного прогноза (стратегии) развития атомной отрасли России. Сквозное планирование; планирование «от задач к ресурсам» с охватом всех стадий жизненных циклов ИЯУ, с учетом всех необходимых мероприятий и требований регулятора, связанных с этим затрат. Этот принцип в сочетании с использованием критерия «эффективность-стоимость» создает основу для объективного решения задач сравнительного анализа альтернатив процессов конверсии ИЯУ, особенно для периода за пределами первоначального проектного ресурса этих установок и вывода их из эксплуатации.

- Принцип вариантности. Разработку программ Конверсии ИЯУ следует осуществлять в нескольких вариантах, отбирая затем рациональный, в идеале оптимальный вариант по критерию «цена-качество». При вариантной разработке варьированию подлежат не только работы и ресурсы, но и целевые показатели служебных характеристик ИЯУ. Разработка программы не должна проводиться по однократному циклу последовательных операций. Процесс разработки должен представлять собой совокупность итерационных последовательно-параллельных операций. При разработке программ не исключено возникновение циклов обратных связей локального и общего характера. Локальные циклы обратных связей способствуют лучшей взаимосвязи и координации близлежащих главных и вспомогательных процессов конверсии ИЯУ и разработки документированной рабочей программы приоритетных действий, оптимизации показателей. Циклическое поэтапное развитие всей программы дает возможность уточнять цели и задачи на каждом витке спирали качества жизненного цикла ИЯУ, а также определять потребность в ресурсах и потенциал реализации программы в целом. В итоге это обеспечивает лучшую перспективу для вариант-

ного верификационного анализа и системного подхода, крайне необходимого, чтобы построить оптимизированную и высокоэффективную программу Конверсии. Содержательная структура целевой программы

должна отражать логическую схему программно-целевого планирования и может быть представлена в виде отдельных разделов (блоков): целевой, функциональный, исполнительный, ресурсный и др.

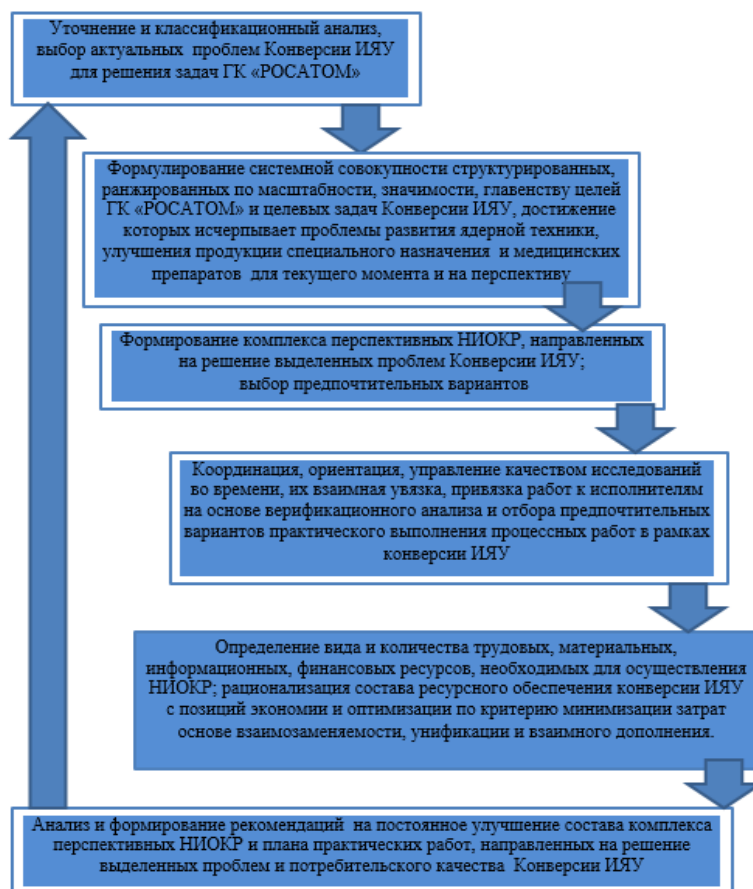


Рисунок 1. Информационная модель Методики
Figure 1. Methodology information model

В частности, целевой блок Методики содержит характеристику генеральной цели программы формирование научно-технических программ конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации и подцелей разных уровней, определяющих в совокупности директивную установку программы. В целевой блок входят заявленные показатели программы и определяющие их целевые нормативы. Содержание целевого блока призвано, с одной стороны, отразить направленность, векторную ориентацию программы, с другой – представить модель «дерева целей» [4] программы Конверсии ИЯУ. Функциональный блок Методики представляет собой ряд скоординированных во временных рамках мероприятий по выполнению НИОКР, целью которых является реализация программы Конверсии ИЯУ. Комплекс исследований должен обладать, свойством полной достаточности в смысле включения в него всех видов мероприятий, необходимых для осуществления директивной установки Методики. Степень детализации пошаговых действий Методики зависит от требуемого уровня глубины исследований и обеспечения безопасности при осуществлении практических работ при конверсии ИЯУ. В рамках функциональных действий необходимо рассматривать не

только основные мероприятия, направленные на достижение цели Методики, но и сопутствующие мероприятия, необходимые для реализации основных. Вместе с тем в конкретный рабочий вариант программы конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации в рамках предлагаемой Методики следует включать пошаговые вспомогательные процессы и действия, без которых трудно гарантировать качественное осуществление Конверсии ядерного реактора в целом. Исполнительный раздел формируется для связи НИОКР с исполнителями в лице центрального аппарата и предприятий ГК «Росатом», контролирующими и управляющими государственными органами и пр., тем или иным образом участвующих в осуществлении программы конверсии ИЯУ, включая ее финансирование [4]. При оформлении исполнительной структуры программы работы детализируются и конкретизируются применительно к адресатам, образующим исполнительную структуру.

Ресурсный блок характеризуется объемами и видами материальных, трудовых, информационных, финансовых ресурсов, необходимых для реализации программы, и источниками их получения. Важно, чтобы свод целей формирования научно-технических

программ конверсии ИЯУ для этапа вывода из эксплуатации был определен исходя, с одной стороны, из характера решаемой проблемы конверсии конкретной ИЯУ, а с другой – ресурсных возможностей ее решения с учетом ограничений, накладываемых наличием ряда проблем риска в атомной отрасли и общей ограниченностью ресурсного потенциала [1,3,4]. Разработка целевой программы конверсии конкретной ИЯУ обусловлена постепенным уточнением задач этой программы, исходя из основных потребностей общества и ГК «Росатом», и цели в дальнейшей работе этой установки, своду требований для будущего функционирования ИЯУ, а также последующему их представлению в виде иерархической системы. Построение «дерева целей» конверсии конкретной ИЯУ, как ключевого элемента целевой программы предполагает регулярную детализацию, осуществляемую в векторе программы управления качеством Конверсии. Такая детализация базируется на функционально-содержательном принципе, где каждый элемент делится на элементы, схожие по природе с первоначальным, только более дифференцированные. Результатом завершеного процесса детализации является установление иерархии элементов, которая и декларируется как «дерево целей» программы.

Таким образом, сказанное выше определяет перспективу удобного применения названной выше Методики для решения практических задач конверсии существующих ИЯУ на этапе их вывода из эксплуатации в векторе уже накопленного мирового и отечественного опыта по выводу из эксплуатации исследовательских ядерных реакторов ²[5].

Пример формирования программы конверсии исследовательского растворного ядерного реактора «Гидра»

В нашем случае конверсии исследовательского реактора «Гидра» (рис. 2.) целевое продление его проектного срока эксплуатации основано на главном процессе – замене его невосстанавливаемого оборудования, корпуса реактора [6].

Корпус этого исследовательского ядерного реактора в период эксплуатации подвергается циклическим термо-механической и радиационной нагрузкам в момент импульса делений ядерного топлива, коррозионным повреждениям при нагревании раствора, динамическому воздействию химического взрыва гремучей смеси в период физического эксперимента. Корпус реактора является критическим конструктивным элементом ИЯУ, определяющим приоритетно ресурс, ядерную и радиационную безопасность, противоаварийную устойчивость установки в целом.



*Рисунок 2. Исследовательский реактор «Гидра»
Figure 2. Hydra research reactor*

Особенностью обоснования безопасности процесса замены корпуса импульсного реактора «Гидра» является акцентирование внимание на возможных опасностях технологических процессов и процедур при продлении его проектных сроков эксплуатации. Поэтому стартовыми действиями на основе названной выше Методики является сбор и анализ служебной информации, как важной компоненты комплексного мероприятия оценки качества практической инженерной деятельности по продлению сроков эксплуатации данного импульсного реактора.

Исходным событием для замены корпуса ИЯУ «Гидра» является исчерпание его проектного ресурса безопасности. Ресурс полностью заменяемого оборудования ИЯУ определяется наличием запасных частей технически необходимого резерва. Если же элемент установки является невосстанавливаемым, то тогда главным процессом продления ресурса является процесс замены такого критического элемента при достижении предельных параметров по критериям безопасности и надежности, противоаварийной устойчивости Корпус и его внутрикорпусные элементы ИЯУ «Гидра» являются невосстанавливаемым оборудованием. Поэтому, со всей очевидностью, замена такого оборудования исследовательской установки должна иметь соответствующие документированные методические обеспечение – программу, включая оригинальную методику, важную для валидированного обоснования безопасности самого процесса замены корпуса реактора.

Основными факторами опасностей при замене корпуса исследовательского реактора является деградация физико-механических свойств конструктивных материалов, которое может вызвать внезапное разрушение конструкций, а также высокая степень радиоактивной загрязненности металлоконструкций, которые подлежат демонтажу и замене. Эксплуатационными факторами деградации служебных элемен-

² Требования к обоснованию возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии. – Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-024-2000. – Госатомнадзор РФ. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/12129621/>

тов и увеличения рисков опасностей при дальнейшей работе ядерного импульсного реактора, влияющими на работоспособность его корпуса, следовательно, и на условия безопасности, и на работоспособность всей ИЯУ, являются: вредные воздействия агрессивной среды и ионизирующего реакторного излучения; внутренние механические напряжения и деградация структуры и физико-механических свойств конструкционных материалов реактора; механические и иные повреждения в результате ошибок обслуживающего персонала или иных воздействий в период чрезвычайных ситуаций и пр. Вместе с этим на условия безопасности процесса ремонта и замены корпуса ИЯУ оказывают существенные ограничения из-за современных изменений законодательства и нормативных документов, в части требования норм и правил регулятора при длительных сроках эксплуатации исследовательского ядерного реактора (НП-024-2000).

В период эксплуатации при работе корпус ИЯУ «Гидра» испытывает импульсные нагрузки, обусловленные инерционным давлением, и коррозионное воздействие от топливного раствора. Цилиндрическая форма корпуса реактора со свободным объемом над раствором для расширения топлива во время импульса позволяет снизить влияние инерционного давления. В 50-60-ые года при проектировании корпуса реактора еще не принималось во внимание временное изменение физико-химических свойств материала корпуса под действием реакторного излучения. Со временем влияние терморadiационной деградации свойств конструкционных материалов на прочность, безопасность эксплуатации исследовательских ядерных реакторов стало значимым фактором опасностей [1,5]. Поэтому, в числе приоритетных критериев для оценки возможности продления сроков эксплуатации ИЯУ является количественное диагностическое прогнозирование запаса прочности и остаточного ресурса корпуса реактора. В этой связи первый критерий обоснования наличия запаса остаточного ресурса корпуса реактора – соответствие результатов проведения расчетных исследований плотности потока быстрых нейтронов и их интегральных значений на наиболее уязвимых элементах корпуса в зависимости от характера работы реактора (мощности и фактического времени работы) показателям норм и правил по ядерной и радиационной безопасности. Известно, что радиационное повреждение стали может быть существенным при флюенсах быстрых нейтронов более 10^{21} нейтр./см² [5] (НП-024-2000).

Этот предел определяет границы запаса ресурса прочности и безопасности корпуса реактора. При сверхвысоких нейтронных дозах материал корпуса – сталь подвержена радиационному набуханию и радиационной ползучести. Нейтронное облучение, сопровождающееся радиационным набуханием материала, может приводить к снижению пластичности материала и трещиностойкости, как следствие вызовет гильотинное разрушение корпуса.

Второй критерий – адекватное обоснование целостности и герметичности корпуса реактора. При работе исследовательской импульсной ядерной уста-

новки происходит радиолиз воды, входящей в топливный раствор. Основным продуктом радиолиза – гремучий газ, стехиометрическая смесь водорода и кислорода ($2H_2+O_2$). При импульсах с энергией ~ 40 МДж и больше выделение гремучих газов носит взрывной характер. Это приводит к динамическому разлету топливного раствора, и силовым ударами по корпусу, вызывает значительные кратковременные механические напряжения в материале корпуса, заметные остаточные деформации. Данные характеристики определяются мониторингом технического состояния ИЯУ, в частности путем наблюдательного контроля за разряжением вакуумной плотности корпуса реактора и диагностическим контролем состояния сварных швов [6,7].

В краткой форме концептуальная информационная модель методики для обоснования безопасности процесса замены корпуса ИЯУ «Гидра» может быть представлена в виде диаграммы Исикавы (рис. 3). Она наиболее полно отражает многогранность специфики основного процесса при продлении срока эксплуатации реактора – замены его корпуса по отношению к инженерно-техническому и физико-технологическому знанию и накопленному опыту по продлению сроков эксплуатации ядерной техники [3,5]. С научной точки зрения, данная модель описывает алгоритм поиска оптимальных путей решения проблемы замены корпуса, с целью продления срока эксплуатации ИЯУ «Гидра», формирования оптимального плана, технологических приемов и методов, позволяющих решить проблему с минимальными социально значимыми рисками и экономическими затратами.

Формирование методики обоснования безопасности замены корпуса исследовательского импульсного реактора

Учитывая накопленный опыт в сфере обращения с ядерной техникой, ядерными энергетическими установками методика обоснования безопасности замены корпуса исследовательского импульсного реактора является интегральной схемой научно-технических методов, информационных и инструментальных средств, а также способов организации и практической реализации деятельности по его замене при продлении сроков эксплуатации ядерного реактора. В основе данной методики лежит использование базовых принципов технического регулирования безопасности радиационно-ядерных опасных работ, согласно нормам НП-033-11, НП-024-2000, НП-048-03, ISO 9000-2015, ISO 19443:2018, а также детализация главных и вспомогательных процессов на базе вероятностной оценки опасностей воздействия, экологической приемлемости технологии выполнения работ и др.

Для практической реализации данной методики необходимо учитывать деятельность в области научных исследований, результаты которых формируют критерии оптимизации основного процесса – замену корпуса импульсного реактора, а также деятельность по верификации и апробации с последующей валидацией информационных и инструментальных средств.

Главной особенностью методики обоснования безопасности процесса замены корпуса исследовательского ядерного реактора (далее – Методика) в жизненном цикле ядерных исследовательских установок, как продление назначенного срока эксплуатации, является акцентирование на методах и процедурах проведения технологических процессов, информационном анализе, как важной компоненты комплексного мероприятия и оценки качества практической инженерной деятельности. Методика (рис. 3) демонстрирует

совокупность взаимосвязанных действий, на основе которой можно исследовать и определить основные причинно-следственные связи факторов и последствий инженерно-технологических воздействий на ИЯУ, а также предупредить возникновение нежелательных факторов и причин опасностей при выполнении практических работ при замене корпуса исследовательского импульсного ядерного реактора «Гидра» (ИИР).

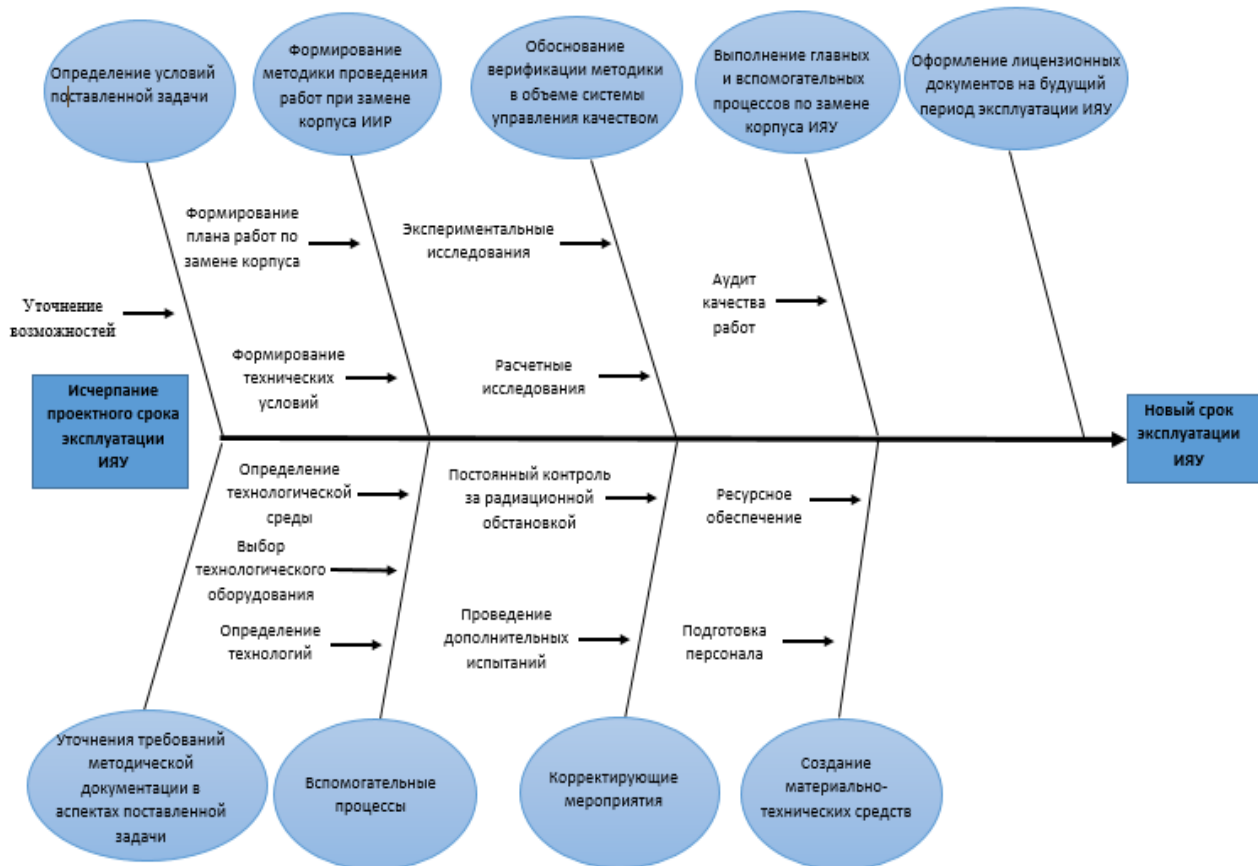


Рисунок 3. Концептуальная информационная модель методики для обоснования безопасности процесса замены корпуса ИЯУ «Гидра»

Figure 3. Conceptual information model of the methodology for safety justification of the Hydra vessel replacement process

Суть Методики обоснования безопасности процесса замены корпуса ИИР состоит в достижении цели – продления срока эксплуатации реактора путем снижения экономических затрат и возможных ущербов при проведении технологических работ, минимизации радиационного воздействия на персонал реактора, а также эффективного управления рисками главного процесса – замены корпуса импульсного исследовательского ядерного реактора. Формирование методики, обеспечивающей безопасность при замене корпуса исследовательского реактора с использованием диаграммы Исикавы, включает в себя проведение последовательных научно-технических мероприятий, исследований и конечное число поэтапных действий. Первым действием методики является определение условий поставленной задачи – уточнение исходных данных и исходных событий, связанных с предыдущим

функционирования реактора и его состоянием на момент начала продления назначенного ранее срока эксплуатации. В числе таких исходных данных и исходных событий за время эксплуатации должны быть изучены: рабочие диаграммы эксплуатации реактора в режимах пуска и работы на мощности; сведения о наличии отказов, влияющих на безопасность ИЯУ; выявленные в долгий период эксплуатации отклонения от условий нормальной проектной эксплуатации; наличие в текущем состоянии проектной, технологической и эксплуатационной документации недостатков и дефицитов по обоснованию безопасности функционирования ИЯУ «Гидра» для будущего периода; сведения, касающиеся оценки компетентности и надежности персонала [8]; а также действующих разрешительных документов на эксплуатацию реактора (лицензия на право эксплуатации ИИР, санитарно-

эпидемиологическое заключение на право работы с радиоактивными веществами, паспорт ИЯУ и др.).

Статистические данные, порученные при реализации данного этапа, служат информационной основой для качественного выполнения расчетных исследований необходимых лабораторных экспериментов. На данном этапе так же проводится комплексное инструментальное обследование реакторной установки методами неразрушающих испытаний и современного материаловедения с целью уточнения возможности его дальнейшей эксплуатации при социальной потребности и инженерной необходимости. Основной целью обследования является оценка фактического технического состояния корпуса реактора в аспектах накопленных повреждений, деформаций, определение его прочностного остаточного ресурса, а также установление дефицитов безопасности для оценки возможности формирования компенсирующих мероприятий для исключения дефицита безопасности и продолжения эксплуатации в будущем.

Вторым этапом является уточнение требований методической документации, необходимой для проведения работ по замене корпуса реактора. В соответствии с требованиями нормативных актов и правовых норм по безопасности, действующих в области использования атомной энергии, в том числе: «Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок (НП-033-11)»; «Требования к возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии (НП-024-2000)»; «Правила ядерной безопасности импульсных исследовательских ядерных реакторов (НП-048-03)»; СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»; СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» и пр. – должны быть установлены требования к организационно-техническим мероприятиям, направленным на обеспечение безопасности при проведении ядерно- и радиационно-опасных работ. Организационно-технические мероприятия должны обеспечивать: не превышение контрольных уровней доз облучения персонала исследовательской установки и нормативов радиоактивных выбросов, регламентируемых нормами радиационной безопасности; снижение радиационного воздействия при проведении ядерно- и радиационно-опасных работ на персонал реактора и окружающую среду до минимально возможного; безопасность и экологическая приемлемость при проведении ядерно-опасных работ и недопущении возникновения аварийной ситуации.

Третий этап: формирование плана проведения работ при замене корпуса исследовательского реактора. Формирование плана проведения работ при замене корпуса основывается на принятых технических условиях функционирования исследовательской установки в данный период. План работ формируется на основании разработанной проектно-сметной документации. Общая схема разрабатываемых плана и программно-методической документации представлена на рисунке 4.

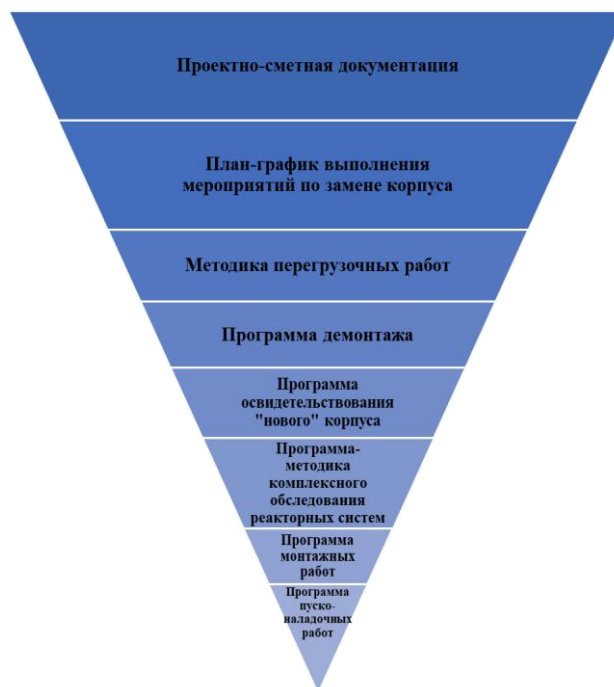


Рисунок 4. Состав разрабатываемой программно-методической документации

Figure 4. Composition of programme and methodological documentation to be developed

Работа по замене корпуса ИЯУ «Гидра» состоит из разных главных и вспомогательных процессов производственно-технологической деятельности для основного этапа жизненного цикла ядерной техники – эксплуатации, техническое обслуживание и ремонт, включая деятельность по модернизации и улучшению. Для каждого процесса необходимо выбрать и верифицировать технологию проведения работ, а также перечень технических средств и необходимого оборудования. Замена корпуса исследовательской установки относится к производственному процессу и является объектом применения «Программы обеспечения качества эксплуатации ИЯУ «Гидра», для текущего периода уже является обязательным для исполнения регламентирующим документом. При проведении практических работ по замене корпуса реактора реализуются корректирующие мероприятия, связанные с обеспечением ядерной и радиационной безопасности персонала. Для их формирования проводится радиационная разведка реакторного зала с целью определения наиболее интенсивно излучающих элементов ИЯУ. Затем выполняется постоянный контроль за радиационной обстановкой в помещении реакторного зала, а также дозовый контроль персонала.

Результатом работ пошаговых действий в рамках названной выше Методики является оптимальный по критерию безопасности план проведения работ при замене корпуса реактора, основанный на минимизации дозовых нагрузок на персонал выбранной последовательности технологических операций: проведение перегрузочных работ; слив топливного раствора; безопасного обращения и хранения топливного раствора; залив топливного раствора в «новый» корпус; демонтаж «старого» корпуса реактора и установка

нового. Заключительным этапом Методики является работа по оформлению лицензионных разрешительных документов на будущую эксплуатацию ИЯУ с новым корпусом реактора. Постоянной и одной из главных вспомогательных технологической операцией при замене корпуса реактора является проведение дезактивационных работ и утилизация радиоактивных отходов. Таким образом, поэтапное выполнение всех задач, указанных в информационной модели Методики приводит к адекватному решению основной проблемы современного лабораторного исследования в области ядерных испытаний на ИЯУ – продлению первоначально назначенного срока их эксплуатации.

Заключение

Предложена методика обоснования безопасности процесса замены корпуса исследовательского импульсного растворного реактора «Гидра», основанная на поэтапной деятельности по ремонту и модернизации ИЯУ и верифицированная путем натурального эксперимента – выполнения практических работ в НИЦ «Курчатовский институт». Данная оригинальная методика обладает свойством инвариантности к различным модификациям ИЯУ и может найти свое применение в работах по конверсии и выводу из эксплуатации ядерной техники ГК «Росатом».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Хамаза А.А. Рискоориентированный подход в регулирующей деятельности в области ядерной и радиационной безопасности. *Радиация и риск*. 2015;24(4):87–97. Режим доступа: <http://radiation-and-risk.com/year2015/4/1189-8>
Khamaza A.A. Application of integrated risk for making decision on nuclear and radiation safety management. *Radiation and Risk*. 2015;24(4):87–97. (In Russ.) Available at: <http://radiation-and-risk.com/en/year2015-en/issue4/952-8> (accessed: 30.01.2024).
2. 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.pnpgu.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.pnpgu.ru/library/1699606807> (accessed: 30.01.2024).
3. 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).
4. Сафронова Н.Н. Трансформация механизма управления энергетическими корпорациями в условиях становления рынка электроэнергетических ресурсов. Диссертация кандидата экономических наук по специальности 08.00.05. РГГУ. Москва, 2008. 147 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004251370> (дата обращения: 30.01.2024).
Safronova N.N. Transformation of the mechanism of management of power corporations in the conditions of formation of the market of electric power resources. Dissertation. Moscow, 2008. 147 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004251370> (accessed: 30.01.2024).
5. Горлинский Ю.Е., Былкин Б.К., Кутков В.А., Павленко В.И. Планирование вывода из эксплуатации исследовательских ядерных установок (Учет зарубежного опыта и рекомендаций МАГАТЭ). Москва: НИЦ «Курчатовский институт», 2014. 69 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006808122> (дата обращения: 30.01.2024).
Gorlinsky Y.E., Bylkin B.K., Kutkov V.A., Pavlenko V.I. Planning for decommissioning of research nuclear facilities (Taking into account foreign experience and IAEA recommendations). Moscow: NRC «Kurchatov institute», 2014. 69 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006808122> (accessed: 30.01.2024).
6. Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Мясников С.В., Петрунин Н.В., Терашкевич С.С. Эксплуатационный контроль состояния металла корпусов растворных реакторов в НИЦ «Курчатовский институт». *Вопросы материаловедения*. 2022;4(112):191–198. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>
Boikova T.V., Kochnov Y.O., Myasnikov S.V., Petrunin N.V., Terashkevich S.S. Operational monitoring of the metal of solution pressure vessel reactors at NRC «Kurchatov institute». *Voprosy Materialovedeniya*. 2022;4(112):191–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198>
7. 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).
8. 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).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Байдаров Д.Ю. – концепция и качественная разработка исследования;

Бойкова Т.В. – изучение тематического материала, систематизация информации;

Кочнов Ю.О. – выявление и исследование факторов, требующих дополнительных исследований и принятия компенсирующих мер для решения проблем;

Сафронова Н.Н. – разработка методической части исследований;

Тутнов И.А. – концепция и написание текста статьи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Дмитрий Юрьевич Байдаров, кандидат юридических наук, директор департамента поддержки новых бизнесов, ГК «Росатом», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: baydarov@mail.ru

Татьяна Владимировна Бойкова, начальник лаборатории физических исследований, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7378-0968>

e-mail: Boykova_TV@nrcki.ru

Юрий Олегович Кочнов, начальник смены комплекса растворных реакторов, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0595-8933>

e-mail: Kochnov_YO@nrcki.ru

Наталья Николаевна Сафронова, кандидат экономических наук, заместитель генерального директора, Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: safronova_nn@accni.ru

Игорь Александрович Тутнов, доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории исследования старения и продления ресурса ЯЭУ, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: Tutnov_IA@nrcki.ru

Поступила в редакцию 29.12.2023

После доработки 08.02.2024

Принята к публикации 15.02.2024

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Baidarov D.Yu. – the concept and qualitative development of the research;

Boykova T.V. – study of thematic material, information systematization;

Kochnov Yu.O. – identification and investigation of factors requiring additional research and taking compensatory measures to solve problems;

Safronova N.N. – development of the methodological part of the research;

Tutnov I.A. – the concept and writing of the text of the article.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Dmitriy Yu. Baidarov, Cand. Sci. (Law), Director of the Department of New Businesses Support, Rosatom State Corporation, Moscow, Russian Federation.

e-mail: baydarov@mail.ru

Tatyana V. Boykova, Head of the Physical Research Laboratory, SIC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7378-0968>

e-mail: Boykova_TV@nrcki.ru

Yurii O. Kochnov, Shift Supervisor of the solution reactor complex, SIC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0595-8933>

e-mail: Kochnov_YO@nrcki.ru

Nataliya N. Safronova, Cand. Sci. (Econ.), Deputy General Director, Association of Organizations of the Nuclear Industry Construction Complex, Moscow, Russian Federation.

e-mail: safronova_nn@accni.ru

Igor A. Tutnov, Dr. Sci. (Engn.), Professor, Head of the Laboratory for Research on Aging and Prolongation of nuclear power plant life, SIC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation.

e-mail: Tutnov_IA@nrcki.ru

Received 29.12.2023

Revision 08.02.2024

Accepted 15.02.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.311.25: 621.64

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-09>

EDN KLCYBR


Оригинальная статья / Original paper



Об актуальности контроля остаточных напряжений и их снижения

В.В. Потапов¹, Д.А. Кузьмин¹ , А.Ф. Гетман¹, А.Ю. Кузьмичевский¹  ,
А.В. Камышев², Л.А. Пасманик², В.Д. Ровинский²

¹ АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»), г. Москва, Российская Федерация

² Инженерное предприятие «ИНКОТЕС» (ООО «ИНКОТЕС»), г. Нижний Новгород, Российская Федерация
 AYKuzmichevskiy@vniiaes.ru




Аннотация. Цель исследования – показать существенное влияние учета фактических значений остаточных напряжений на прочность и ресурс безопасной эксплуатации объектов атомной энергетики. Для определения прочности и ресурса использовались общепринятые подходы физики прочности и механики разрушения. Исследована степень влияния остаточных напряжений на прочность и ресурс элементов трубопроводов в случае циклически действующей нагрузки, при статической нагрузке, когда есть опасность хрупкого разрушения, и в случае коррозионного воздействия. Объектами исследования являлись трубопроводы атомных электростанций. Отмечено, что современное состояние науки и техники позволило создать методику неразрушающего контроля механических напряжений, действующих в металлоконструкциях, основанную на использовании метода акустоупругости. В настоящее время на базе этого метода разработана и аттестована для применения в области использования атомной энергии методика выполнения измерений остаточных сварочных и монтажных напряжений в трубопроводах. Методика измерений предусматривает определение мембранных и изгибных напряжений в кольцевых сечениях, расположенных на прямолинейных участках трубопроводов. Значения напряжений в конструктивных элементах трубопроводов и остаточных сварочных напряжений в наплавленном металле сварных соединений определяются с применением соотношений, основанных на использовании принципе уравнивания. Показана актуальность введения в порядок контроля технического состояния трубопроводов и оборудования атомных электростанций процедуры определения фактического уровня остаточных напряжений, позволяющей существенно повысить достоверность оценки их прочности и ресурса. Обосновано, что для реализации процедуры определения фактического уровня остаточных напряжений необходимо использовать систему неразрушающего контроля остаточных сварочных и монтажных напряжений с использованием метода акустоупругости, основанную на методике измерений, позволяющей определять фактические значения остаточных напряжений с установленными характеристиками погрешности.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, метод акустоупругости, неразрушающий контроль, ресурс трубопроводов, остаточные напряжения, расчеты на прочность.

Для цитирования: Потапов В.В., Кузьмин Д.А., Гетман А.Ф., Кузьмичевский А.Ю., Камышев А.В., Пасманик Л.А., Ровинский В.Д. Об актуальности контроля остаточных напряжений и необходимости их снижения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):68-75. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-09>


For citation: Potapov V.V., Kuzmin D.A., Getman A.F., Kuzmichevskiy A.Yu., Kamyshev A.V., Pasmanik L.A., Rovinskiy V.D. Relevance of monitoring residual stresses and the need to reduce them. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):68-75 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-09>

Relevance of monitoring residual stresses and the need to reduce them

Vladimir V. Potapov¹, Dmitry A. Kuzmin¹ , Alexander F. Getman¹,
Alexander Yu. Kuzmichevskiy¹  , Arkady V. Kamyshev², Lev. A. Pasmanik²,
Viktor D. Rovinskiy²

¹ JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation» (JSC VNIIAES), Moscow, Russian Federation

² Engineering company «ENCOTES» (ENCOTES LLC), Nizhny Novgorod, Russian Federation

 AYKuzmichevskiy@vniiaes.ru

Annotation. The objective of the study is to show the significant impact of taking into account the actual values of residual stresses on the strength and resource of safe operation of nuclear power facilities. Generally accepted approaches of strength physics and fracture mechanics were used to determine strength and service life. The degree of influence of residual stresses on the strength and service life of pipeline elements in the case of a cyclically acting load, under static load, when there is a danger of brittle fracture, and in the case of corrosion is investigated. The objects of the study were pipelines of nuclear power plants. It is noted that the current state of science and technology has made it possible to create a technique for non-destructive testing of mechanical stresses acting in

metal structures based on the use of the acoustoelasticity method. Currently, on the basis of this method, a method for measuring residual welding and installation stresses in pipelines has been developed and certified for use in the field of atomic energy use. The measurement technique provides for the determination of membrane and bending stresses in annular sections located on rectilinear sections of pipelines. The values of stresses in the structural elements of pipelines and residual welding stresses in the deposited metal of welded joints are determined using ratios based on the use of the balancing principle. The relevance of introducing into the procedure for monitoring the technical condition of pipelines and equipment of nuclear power plants the procedure for determining the actual level of residual stresses, which significantly increases the reliability of the assessment of their strength and service life, is shown. It is proved that in order to implement the procedure for determining the actual level of residual stresses, it is necessary to use a non-destructive testing system for residual welding and installation stresses using the acoustoelasticity method based on a measurement technique that allows determining the actual values of residual stresses with established error characteristics.

Keywords: acoustoelastic method, nondestructive testing, pipeline resource, nuclear power plant, residual stresses, strength calculation.

Введение

Остаточные напряжения (далее – ОН) возникают в элементах конструкций вследствие натяга при монтаже трубопроводов, локальной пластической деформации и неравномерного термического воздействия на оборудование.

При разработке норм расчета на прочность^{1,2} в середине XX в. отсутствовали научно-технические решения для создания методов неразрушающего контроля фактических значений ОН в конструкциях. С учетом этого действующие нормативные документы предусматривали при расчете на сопротивление усталости сварных соединений, принимать, ОН в сварных швах равными пределу текучести. ОН также учитывались при расчете на сопротивление хрупкому разрушению элементов присоединенного оборудования. В частности, например, в рекомендациях по учету ОН при расчете на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов³, величину ОН после термического отжига и отпуска предлагалось принимать равной 30% от предела текучести.

В то же время, с учетом многофакторности процесса монтажа, фактические значения ОН могли существенно отличаться от рекомендуемых значений и, как следствие, приводить к недостоверной оценке остаточного ресурса элементов оборудования и трубопроводов.

Современное состояние науки и техники позволило создать метод и аппаратное обеспечение неразрушающего контроля фактических значений ОН при оценке остаточного ресурса, основанные на использовании явления акустоупругости, устанавливающего связь скоростей распространения объемных упругих волн со значениями механических напряжений [1].

Разработан порядок использования метода акустоупругости для измерения мембранных и изгибных напряжений, определяемых продольными силами и изгибающими моментами в сечениях трубопровода [2,3,4]. Также разработан порядок использования метода акустоупругости и принципа уравнивания для определения остаточных сварочных напряжений в наплавленном металле сварных соединений [5,6]. Разработана и аттестована для применения в области использования атомной энергии соответствующая методика выполнения измерений⁴. Указанная методика может быть положена в основу системы неразрушающего контроля фактических значений ОН, что позволит обеспечить повышение достоверности оценки напряженно-деформированного состояния элементов оборудования и трубопроводов при расчетах прочности и ресурса.

В настоящей статье исследована степень влияния ОН на прочность и ресурс элементов трубопроводов в случае циклически действующей нагрузки, при статической нагрузке, когда есть опасность хрупкого разрушения, и в случае коррозионного воздействия, а также влияние ОН на кинетику роста трещин. При проведении исследования сопоставлялись результаты оценки ресурса при отсутствии ОН и при значениях ОН, равных пределу текучести.

Сопротивление усталости

Рассмотрим количественно влияние остаточных напряжений, равных пределу текучести, на амплитуду разрушающего циклического напряжения σ_a , а также на уменьшение количества циклов до разрушения N_b при этом же остаточном напряжении. Для простоты и повышения общности анализа использовали диаграмму

¹ Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Правила и нормы в атомной энергетике (ПНАЭГ-7-002-86). – Госатомэнергонадзор СССР. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

² Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность. – ГОСТ Р 59115.9-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. – Москва, 2022. – 113 с.

³ Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет (РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012). – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2012.

⁴ Монтажные и остаточные сварочные напряжения в трубопроводах атомных электростанций. Методика измерений с использованием метода акустоупругости (МТ 1.1.4.02.002.2114-2023). – Росатом. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений в области использования атомной энергии. – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2023. – Режим доступа: https://fif.atomstandard.ru/atom/?CLASS_ID=atSimpleObjView&MODEL_ID=atMMMethod&DOCUMENT_ID=atSimpleObjView_139711838032592&OBJECT_ID=394 (дата обращения 10.01.2024).

Хей-Зодерберга для стали 45, приведенную на рисунке 1⁵.

На рисунке 1 по горизонтальной оси откладывают среднее напряжение цикла σ_m , по вертикальной – амплитуду циклического напряжения σ_a .

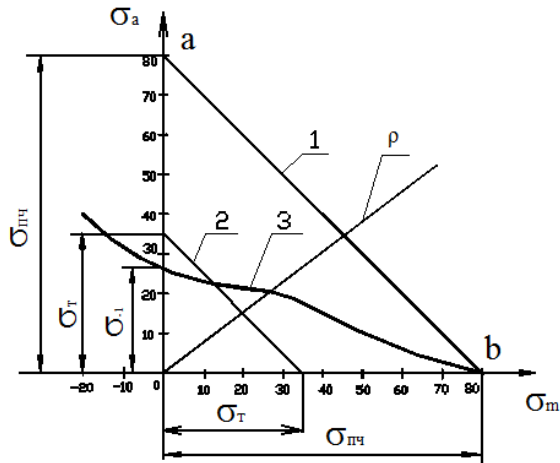


Рисунок 1. Диаграмма Хей-Зодерберга для стали 45 при $N_p = 5 \cdot 10^6$: 1 – Уравнение прямой $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_{пч}$ (предел прочности); 2 – Уравнение прямой $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_z$ (предел выносливости); 3 – Экспериментальная кривая предела выносливости, полученная при разных амплитудах и постоянных составляющих цикла $\rho = \sigma_a/\sigma_m$ на одной и той же базе $N_p = 5 \cdot 10^6$. Ордината при абсциссе $\sigma_m = 0$ представляет собой предел выносливости при симметричном цикле нагружения, $\rho = \infty$ обозначается через σ_{-1}

Figure 1. The Hay-Zoderberg diagram for steel 45 at $N_p = 5 \cdot 10^6$: 1 – Equation of the straight line $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_{пч}$ (tensile strength); 2 – Equation of the line $\sigma_a + \sigma_m = \sigma_z$ (endurance limit); 3 – An experimental curve of the endurance limit obtained at different amplitudes and constant component cycles $\rho = \sigma_a/\sigma_m$ on the same base $N_p = 5 \cdot 10^6$. The ordinate at abscissa $\sigma_m = 0$ represents the endurance limit for a symmetrical loading cycle, $\rho = \infty$ is denoted by σ_{-1}

При $\sigma_m = 0$ величина $\sigma_a = \sigma_{-1} = 27$ МПа.

При $\sigma_m = \sigma_\tau$, то есть пределу текучести ($R_{p0.2}^T$), $\sigma_a = 0,74\sigma_{-1} = 20$ МПа.

Для оценки сокращения числа циклов до разрушения в случае остаточных напряжений на уровне предела текучести по сравнению с отсутствием остаточных напряжений, воспользуемся кривой усталости (кривой Веллера) из норм расчета на прочность углеродистых и легированных сталей с $\sigma_F > R_{p0.2}^T/R_m^T \leq 0,7$ до $T = 623$ К (350°C)⁶ (рис. 2).

В связи с тем, что кривые на рисунках 1 и 2 взяты из разных источников, для оценки величины сокращения числа циклов до разрушения, воспользуемся относительным сокращением амплитуды напряжения на 0,26% для исходного числа циклов до разрушения, равном, как указано на рисунке 1, $N_p = 5 \cdot 10^5$.

Приняв, что наклон кривой усталости при наличии среднего напряжения цикла, равного пределу текучести, останется таким же, как и при нулевом среднем напряжении цикла, получим, что число циклов до разрушения при наличии среднего напряжения цикла $\sigma_m = R_{p0.2}$, сократится примерно в 12 раз, то есть с N_p (при $\sigma_m = 0$) = $5 \cdot 10^5$ до N_p (при $\sigma_m = R_{p0.2}$) = $4 \cdot 10^4$ (рис. 2).

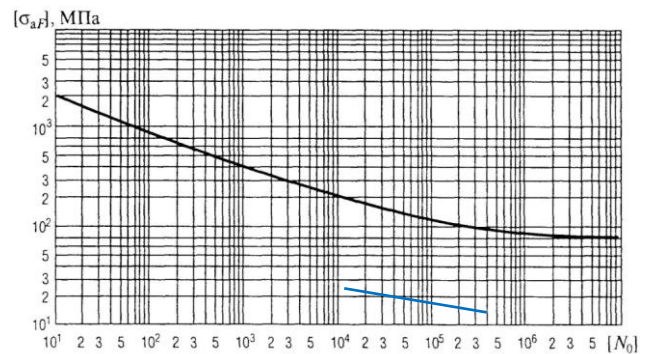


Рисунок 2. Расчетная кривая усталости углеродистых и легированных сталей

Figure 2. Calculated fatigue curve of carbon and alloy steels

Таким образом:

1. Среднее напряжение цикла σ_m может оказывать существенное влияние на разрушающую амплитуду напряжения σ_a и число циклов до разрушения N_p . Так при $\sigma_m = \sigma_\tau$, то есть пределу текучести, разрушающая амплитуда уменьшается на 26%, а число циклов до разрушения уменьшится в 12 раз по сравнению с исходным состоянием при нулевом среднем напряжении цикла.

2. Как видно из диаграммы Хей-Зодерберга (см. рис. 1) при приближении среднего напряжения цикла к пределу прочности, амплитуда разрушающего напряжения стремится к нулю.

Циклическая трещиностойкость

При наличии трещины ресурс конструкции определяется скоростью роста трещины. В общем виде скорость роста трещины da/dN зависит от коэффициента интенсивности напряжений K_I , уравнение (1):

$$\frac{da}{dN} = f(K_I), \quad (1)$$

где a – размер трещины в направлении толщины стенки трубопровода или корпуса сосуда давления;

N – циклы нагружения.

Если при эксплуатации обнаружена трещина с размером a_0 и известен допустимый во время эксплуатации размер $[a]$, то ресурс можно определить из уравнения (1) (рис. 3).

⁵ ПроСопромат.ру. – Технический портал, посвященный Сопромату и истории его создания. – Режим доступа: <https://prosopromat.ru/sopromat/ustalost/predelvyносливости-materialov-diagrammy-vellera-i-xeyzoderbertaefektrebin-dera.html> (дата обращения 10.01.2024).

⁶ Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Правила и нормы в атомной энергетике (ПНАЭГ-7-002-86). – Госатомэнергонадзор СССР. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

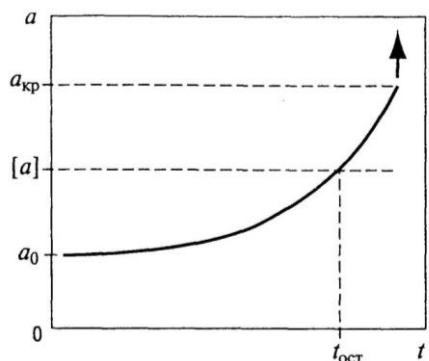


Рисунок 3. Рост несплошности во время эксплуатации: a_0 – размер обнаруженной несплошности; $[a]$ – допустимый во время эксплуатации размер несплошности; $a_{кр}$ – критический размер несплошности, при достижении которого происходит быстрое, окончательное разрушение конструкции; $t_{ост}$ – остаточный ресурс конструкции с несплошностью.

Figure 3. The growth of metal discontinuity (crack) during operation: a_0 – size of the detected discontinuity; $[a]$ – permissible discontinuity size during operation; $a_{кр}$ – the critical size of discontinuity, upon reaching which rapid, final destruction of the structure occurs; $t_{ост}$ – residual life of a structure with a discontinuity

При циклическом нагружении зависимость между скоростью роста трещины и размахом коэффициента интенсивности напряжений ΔK_1 имеет вид уравнения (2)⁷ [7]:

$$\frac{da}{dN} = C_0 \left(\frac{\Delta K_1}{\sqrt{1-R}} \right)^m, \quad (2)$$

где N – число циклов нагружения;

C_0 и m – константы материала;

R – коэффициент асимметрии цикла.

Влияние коррозионной среды и температуры испытания (эксплуатации) может быть учтено с помощью коэффициентов C_0 и m . Коэффициент асимметрии цикла определяется максимальным K_{max} и минимальным K_{min} значениями коэффициентов интенсивности напряжения в цикле $R = K_{min}/K_{max}$.

Для расчета K_{max} и K_{min} выделяют циклы нагружения, как при расчете на сопротивление усталости, и для каждого i -го цикла определяют $(\sigma_{пр})_{maxi}$ и $(\sigma_{пр})_{mini}$.

Значения $(\sigma_{пр})_{maxi}$ и $(\sigma_{пр})_{mini}$ определяют с учетом остаточных напряжений, действующих по направлениям главных напряжений от усилий. При этом остаточные напряжения сжатия не учитывают.

Напряжения $|(\sigma_{пр})_{maxi}|$ в расчете кинетики несплошностей принимают равными не более $R_{p0,2}$ при температуре 20°C при сохранении размаха напряжений. Каждый i -й цикл из этой группы циклов нагружения характеризуется максимальным K_{maxi} и минимальным K_{mini} для заданной точки контура.

Коэффициент асимметрии i -го цикла $R_i (R_i > -1)$ определяется по формуле (3):

$$R_i = \frac{(\sigma_{пр})_{mini}}{(\sigma_{пр})_{maxi}} = \frac{K_{mini}}{K_{maxi}}. \quad (3)$$

Для циклов нагружения, которые характеризуются значениями $R < -1$, в расчете принимают $R = -1$.

Для i -го цикла нагружения рост несплошности от значения a_{i-1} до значения a_i рассчитывают по уравнению (4):

$$N_i = \frac{1}{C_0} \int_{a_{i-1}}^{a_i} (1-R_i)^{\frac{m}{2}} \Delta K_i^{-m} da, \quad (4)$$

где a, m – размер несплошности;

ΔK_i , МПа·м^{1/2}.

В таблице 1 приведены значения C_0, m для нескольких классов стали при $da/dN \leq 10^{-5}$ м/цикл, $R = 0$, $T \leq 350^\circ\text{C}$ [7].

Таблица 1. Константы для расчета кинетики трещин
Table 1. Constants for calculating fracture kinetics

Класс стали	m	C_0
Легированные стали типа 10ГН2МФА, 15Х2НМФА и их сварные соединения	2,6	$5,8 \cdot 10^{-11}$
Нелегированные стали типа 22К и их сварные соединения	2,9	$3 \cdot 10^{-11}$
Коррозионно-стойкие аустенитные стали типа 0Х18Н10Т	2,9	4,02

При расчете роста несплошности в деталях из легированных сталей типа 15Х2НМФА и их сварных соединений с учетом контакта несплошности с обессоленной водной средой при температуре до 300°C значения констант C_0 и m выбирают по диаграмме усталостного разрушения, приведенной в нормативных документах, или методике М-02-91⁷.

Если для подобного расчета для сталей типа 15Х2НМФА использовать константы из таблицы 1, значение коэффициента C_0 необходимо увеличить в 10 раз.

Для хромоникелевых коррозионностойких сталей типа 08Х18Н10Т, их сварных соединений и наплавов в одной рабочей среде значение коэффициента C_0 (табл. 1) увеличивают в 2 раза, а при контакте несплошностей в деталях из тех же сталей с обессоленной водной средой кипящих реакторов (водой, паром, пароводяной смесью) коэффициент C_0 увеличивают в 10 раз. Допускается использование экспериментально обоснованных диаграмм усталостного разрушения в рабочей среде заданных параметров с учетом механических факторов R и ΔK .

Влияние нейтронного облучения при расчете несплошностей не учитывается. Уравнение (4) применимо при $\Delta K_i \geq (10^{-11}/C_0)^{1/m}$.

Как следует из уравнения (2), остаточный ресурс конструкции с трещиной определяется скоростью роста трещины, а также критическим размером трещины $a_{кр}$: чем больше $a_{кр}$, тем больше остаточный ресурс.

⁷ Методика определения допустимых размеров несплошностей во время эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС (М-02-91). Москва, 1991.

Оценим изменение скорости роста трещины при появлении остаточных напряжений (ОН) на уровне предела текучести $OH = R_{\rho 0,2}$ по сравнению, когда остаточные напряжения равны нулю: $OH = 0$.

Из уравнения (4) следует, что отношение скорости роста трещины при $OH=R_{\rho 0,2}$ к скорости роста трещины при $OH=0$ равно – уравнение (5):

$$\frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{OH=R_{\rho 0,2}}}{\left(\frac{da}{dN}\right)_{OH=0}} = \frac{\left\{1/(1-R_{OH=R_{\rho 0,2}})\right\}^{m/2}}{\left\{1/(1-R_{OH=0})\right\}^{m/2}} = 28,5 \quad (5)$$

Таким образом, скорость роста трещины при остаточных напряжениях, равных пределу текучести, по сравнению, когда эти напряжения равны нулю, увеличивается в 28,2 раза.

При вычислениях учли, что коэффициент $m = 2,9$ при $OH=0$ цикл будет пульсирующим, то есть $R=0$, а при $OH = R_{\rho 0,2}$ коэффициент R принимали равным 0,9.

Если коэффициент асимметрии цикла принять 0,8, то при тех же остальных значениях, скорость роста трещины увеличится также значительно – в 10,3 раза.

Влияние коррозионной среды видно в уравнении (6), если в уравнение (5) ввести коэффициенты, отвечающие за влияние коррозионной среды:

$$\frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{OH=R_{\rho 0,2}}}{\left(\frac{da}{dN}\right)_{OH=0}} = \left(C_{корр}/C_0\right) \frac{\left\{1/(1-R_{OH=R_{\rho 0,2}})\right\}^{m/2}}{\left\{1/(1-R_{OH=0})\right\}^{m/2}} \cdot (6)$$

Если принять $(C_{корр}/C_0) = 10$ (влияние среды описано выше), то при $R = 0,9$ скорость увеличится в 282 раза, а при $R = 0,8$ – в 103 раза.

Влияние остаточных напряжений на хрупкое разрушение

Хрупкое разрушение – это разрушение детали без заметных пластических деформаций. Если конструкция сделана из пластичного материала (а таковыми являются практически все конструкционные стали, используемые в атомной энергетике), то хрупкое разрушение может реализоваться только при напряжениях ниже предела текучести. В работах [7,8] разрушающие напряжения $\sigma_{кр}$, при которых реализуются хрупкие разрушения, оцениваются величинами, удовлетворяющими условию (7):

$$\sigma_{кр} \leq 0,8R_{\rho 0,2} \quad (7)$$

Такое резкое снижение прочности конструкции возможно только при следующих условиях:

- 1) наличие в ней дефекта сплошности (трещина и т.п.);
- 2) реализация в конструкции таких условий, при которых она становится чувствительной к дефектам сплошности.

На чувствительность к несплошностям конструкционных сталей влияет большое число факторов: технология изготовления, температура эксплуатации, способ нагружения, размеры конструкции, форма и размеры несплошности, окружающая среда, ионизирующее излучение и др. На рисунке 4 представлены результаты испытаний механических свойств стали 22К размером 20x50 мм с боковыми надрезами глубиной 2,5 мм и шириной 0,2 мм в зависимости от температуры испытания T [8].

В области температуры $T_{кр1}$ происходит резкое изменение доли волокнистого излома F_0 при испытаниях ударной вязкости. При температуре $T_{кр2}$ резко меняется вязкость разрушения K_{Ic} и разрушающее напряжение $\sigma_{кр}$. Область слева от $T_{кр2}$ называют областью хрупкого состояния стали, область справа от $T_{кр1}$ – областью вязких состояний, а температура $T_{кр1}$ и $T_{кр2}$ – критическими температурами хрупкости.

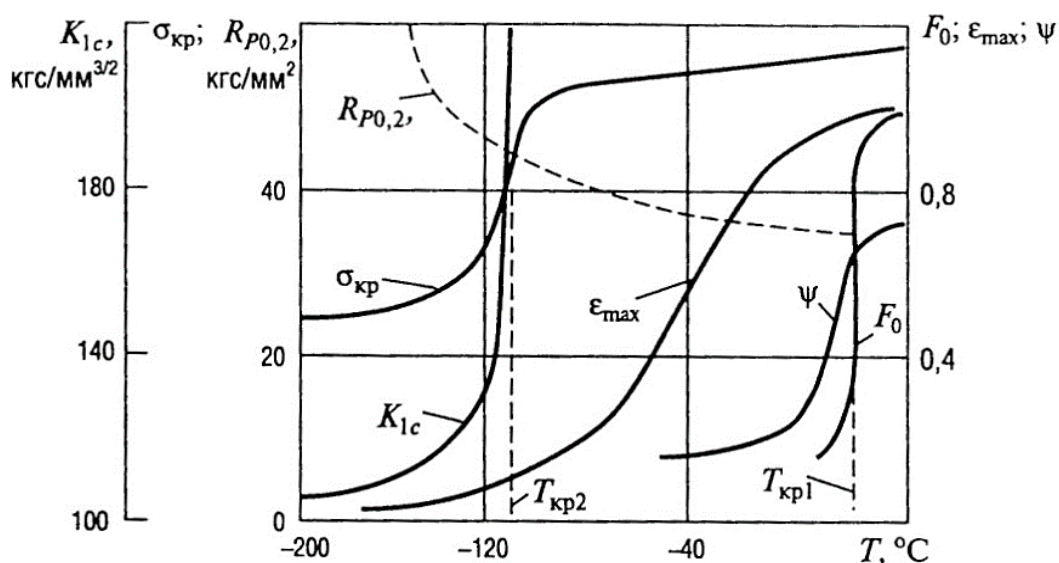


Рисунок 4. Температурные зависимости механических характеристик
Figure 4. Temperature dependences of mechanical characteristics

Повышение чувствительности сталей к несплошностям обусловлено уменьшением запаса пластичности и температуры эксплуатации, увеличением размеров конструкции, размеров несплошности, коррозионной агрессивности среды (для поверхностных несплошностей), скорости приложения нагрузки, напряжений, времени эксплуатации; радиационным облучением (например, нейтронами с энергией $E > 0,5$ МэВ); переходом от статической к циклически повторяющейся нагрузке.

Следует подчеркнуть, что само по себе повышение чувствительности конструкции к несплошностям, переход материала конструкции в хрупкое состояние не является опасным. Опасность возникает только тогда, когда в конструкции имеются дефекты сплошности опасных размеров.

Таким образом, в случае хрупкого состояния наличие остаточных напряжений на уровне предела текучести может привести элемент конструкции к разрушению; конструкция может не иметь ресурса и разрушиться в ходе первого нагружения.

Выводы

Выполнен анализ прочности и ресурса по критериям сопротивления зарождению трещины усталости, сопротивления хрупкому разрушению и трещиностойкости при отсутствии и наличии коррозионной среды. Во всех случаях определяли влияние остаточных напряжений на уровне предела текучести путем сравнения со случаем, когда остаточные напряжения равны нулю. Показано существенное влияние остаточных напряжений на прочность и ресурс, требующее введения в обязательном порядке контроля уровня остаточных напряжений в элементах трубопроводов и оборудования, и их снижения, если это влияние существенное.

При этом показано:

1. Среднее напряжение цикла σ_m может оказывать существенное влияние на разрушающую амплитуду

напряжения σ_a и число циклов до разрушения N_p . Так при $\sigma_m = R_{p0,2}$, разрушающая амплитуда уменьшается на 26%, а число циклов до разрушения уменьшится в 12 раз по сравнению с исходным состоянием при нулевом среднем напряжении цикла.

2. Как видно из диаграммы Хей-Зодерберга (рисунок 1) при приближении среднего напряжения цикла к пределу прочности, амплитуда разрушающего напряжения стремится к нулю.

3. Скорость роста трещины при остаточных напряжениях, равных пределу текучести, по сравнению со случаем, когда остаточные напряжения равны нулю, увеличивается в 28 раз. Если коэффициент асимметрии цикла принять 0,8, то при тех же остальных значениях, скорость роста трещины увеличится в 10,3 раза.

4. Учет влияния коррозионной среды показывает, что указанная выше скорость роста дефектов может увеличиться соответственно в 280 раз, и в 103 раза.

5. В случае хрупкого состояния наличие остаточных напряжений на уровне предела текучести может привести элемент конструкции к разрушению; конструкция может не иметь ресурса и разрушиться в ходе первого нагружения.

6. Существенное влияние остаточных напряжений на прочность и ресурс требует рассмотреть возможность введения в порядок контроля технического состояния трубопроводов определение уровня остаточных напряжений в элементах трубопроводов и оборудования.

7. Для оценки фактического уровня остаточных напряжений необходимо использовать систему неразрушающего контроля, основанную на использовании метода акустоупругости, позволяющей определять фактические значения остаточных напряжений с установленными характеристиками погрешности измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Нижний Новгород: ТАЛАН, 2005. 208 с. Режим доступа: <http://vibro.donntu.ru/books/700.html?lang=ru> (дата обращения 10.01.2024).
Nikitina N.E. Acoustoelasticity. Practical application experience. Nizhny Novgorod: TALAM, 2005. 208 p. (In Russ.) Available at: <http://vibro.donntu.ru/books/700.html?lang=ru> (accessed: 10.01.2024).
2. Камышев А.В., Миронов Н.А., Пасманик Л.А., Модестов В.С., Пивков А.В. Метод расчетно-инструментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов трубопроводов с использованием силовых граничных условий. *Контроль. Диагностика*. 2015;9:45–51. <https://doi.org/10.14489/td.2015.09.pp.045-051>
Kamyshov A.V., Mironov N.A., Pasmanik L.A., Modestov V.S., Pivkov A.V. Calculated-instrumental method for estimation of stress-strain state of the elements of pipeline systems using the power of boundary conditions. *Control. Diagnostics*. 2015;9:45–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/td.2015.09.pp.045-051>
3. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В. Расчетно-инструментальный метод оценки напряженно-деформированного состояния с определением силовых граничных условий методом акустоупругости и его применение для анализа повреждаемости сварного соединения №111 парогенераторов АЭС с РУ ВВЭР. *Тяжелое машиностроение*. 2016;1-2:11–18. Режим доступа: <https://cniitmash.com/tm/архив/2016/01-02-2016.html> (дата обращения 10.01.2024).
Kamyshov A.V., Pasmanik L.A., Smirnov V.A., Modestov V.S., Pivkov A.V. Calculated-instrumental method for estimation of the stress-strain state with definition of force boundary conditions by the acoustoelasticity method and its application for analysis of damage to weld. *Russian journal of heavy machinery*. 2016;1-2:11–18. (In Russ.) Available at: <https://cniitmash.com/tm/архив/2016/01-02-2016.html> (accessed: 10.01.2024).

4. Махутов Н.А., Пасманик Л.А., Камышев А.В. Метод акустоупругости для оценки напряженно-деформированного состояния и безопасности элементов трубопроводных систем. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2018;1:19–29. Режим доступа: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J1640152X> (дата обращения 10.01.2024).

Makhutov N.A., Pasmanik L.A., Kamyshev A.V. Application of the acoustoelasticity method for estimation of stress-strain state and safety of the components of pipeline systems. Safety and emergencies problems. 2018;1:19–29. (In Russ.) Available at: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J1640152X> (accessed: 10.01.2024).

5. 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>

6. 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).

7. 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).

8. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. Москва: Машиностроение, 1981. 272 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001044626> (дата обращения: 10.01.2024).

Makhutov N.A. Deformation criteria of destruction and calculation of structural elements for strength. Moscow: Mashinostroenie 1981. 272 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001044626> (accessed: 10.01.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Потапов В.В. – общее руководство и планирование исследования, подготовка и согласование заключения;

Кузьмин Д.А. – разработка теории, изучение тематического материала, систематизация информации, проведение исследований, написание текста статьи, анализ результатов;

Гетман А.Ф. – постановка задач, определение методики исследования, написание текста статьи;

Кузьмичевский А.Ю. – разработка теории, изучение тематического материала, систематизация информации, проведение научных исследований, написание текста статьи, анализ результатов;

Камышев А.В. – предоставление материалов авторских исследований по теме, анализ достоверности и сходимости результатов;

Пасманик Л.А. – предоставление материалов авторских исследований по теме, анализ достоверности и сходимости результатов;

Ровинский В.Д. – общее руководство и планирование исследования, подготовка и согласование заключения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Без дополнительного финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимир Вячеславович Потапов, кандидат технических наук, заместитель директора ВНИИАЭС-НТП, директор отделения управления ресурсом АЭС, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.
e-mail: VVPotapov@vniiaes.ru

Дмитрий Александрович Кузьмин, кандидат технических наук, руководитель департамента прочностной надежности оборудования и трубопроводов АЭС, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2618-9724>

e-mail: DAKuzmin@vniiaes.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Potapov V.V. – general management and planning of the study, preparation and approval of the conclusion;

Kuzmin D.A. – development of theory, study of thematic material, systematization of information, conducting scientific research, writing the text of the article, analyzing the results;

Getman A. F. – setting the objectives, defining the research methodology, writing the text of the article;

Kuzmichevskiy A.Yu. – development of theory, study of thematic material, systematization of information, conducting scientific research, writing the text of the article, analyzing the results;

Kamyshev A.V. – provision of author's research materials on the problem under study, analysis of reliability and convergence of results;

Pasmanik L.A. – provision of author's research materials on the problem under study, analysis of reliability and convergence of results;

Rovinskij V.D. – general management and planning of the study, preparation and approval of the conclusion.

FUNDING:

No additional funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir V. Potapov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of VNIIAES-STD, Director of the Department of NPP Resource Management, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.
e-mail: VVPotapov@vniiaes.ru

Dmitry A. Kuzmin – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Strength Reliability of NPP Equipment and Pipelines, JSC «VNIIAES», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2618-9724>

e-mail: DAKuzmin@vniiaes.ru

Александр Федорович Гетман, доктор технических наук, профессор, руководитель проекта, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.
e-mail: AFGetman@vniiaes.ru

Александр Юрьевич Кузьмичевский, кандидат технических наук, руководитель направления по риск-анализу технического состояния оборудования и трубопроводов АЭС, АО «ВНИИАЭС», г. Москва, Российская Федерация.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0285-0351>
e-mail: AYKuzmichevskiy@vniiaes.ru

Аркадий Вадимович Камышев, кандидат технических наук, начальник отдела новой техники, ООО «ИНКОТЕС», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.
e-mail: kamyshev@encotes.ru

Лев Абрамович Пасманик, заместитель генерального директора по развитию, ООО «ИНКОТЕС», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.
e-mail: pla@encotes.ru

Виктор Донатович Ровинский, генеральный директор, ООО «ИНКОТЕС», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.
e-mail: info@encotes.ru

Alexander F. Getman, Dr. Sci. (Engn.), Professor, Project Manager, JSC «VNIAES», Moscow, Russian Federation.
e-mail: AFGetman@vniiaes.ru

Alexander Yu. Kuzmichevskiy, Cand. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Eng.), Head of Risk Analysis of Technical Condition of NPP Equipment and Pipelines, JSC «VNIAES», Moscow, Russian Federation.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0285-0351>
e-mail: AYKuzmichevskiy@vniiaes.ru

Arkady V. Kamyshev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of New Technology, ENCOTES LLC, Nizhniy Novgorod, Russian Federation.
e-mail: kamyshev@encotes.ru

Lev A. Pasmanik, Deputy General Director for Development, ENCOTES LLC, Nizhniy Novgorod, Russian Federation.
e-mail: pla@encotes.ru

Viktor D. Rovinskiy, General Director, ENCOTES LLC, Nizhniy Novgorod, Russian Federation.
e-mail: info@encotes.ru

Поступила в редакцию 12.01.2024
После доработки 01.03.2024
Принята к публикации 05.03.2024

Received 12.01.2024
Revision 01.03.2024
Accepted 05.03.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.7: 621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-10>

EDN RRNJCF

Оригинальная статья / Original paper




Исследование комбинированных вариантов размещения выгорающих поглотителей Er и Gd в тепловыделяющих сборках реакторов ВВЭР для оптимизации процесса выгорания

А.С.К. Рахман¹  , М.А. Увакин² , М.М. Хоссен³ 

¹ Управление по регулированию атомной энергии Бангладеш (БАЭРА), Агаргаон, Дакка-1207, Бангладеш

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

³ Комиссия по атомной энергии Бангладеш (БАЭС), Агаргаон, Дакка-1207, Бангладеш

 ranisur01@gmail.com

Аннотация. В водо-водяном реакторе типа ВВЭР избыточную реактивность могут компенсировать материалы с высоким поглощением нейтронов. В статье проведен теоретический и расчетный анализ использования выгорающих поглотителей, размещенных в твэле, для снижения запаса реактивности и увеличения времени перегрузки реакторов типа ВВЭР. Для исследования снижения запаса реактивности расчет выгорания топлива проводился без выгорающего поглотителя и с комбинацией различных выгорающих поглотителей, а именно природного гадолиния (Gd) и эрбия (Er), с использованием упрощенной программы GETERA. В результате расчета установлено, что изменение количества выгорающего поглотителя (Gd, Er) внутри ТВС определяет запас реактивности по выгоранию топлива и повышает эффективность уранового топлива (UO₂). Совместное использование Gd и Er приводит к более плавному снижению реактивности реактора за счет меньшего сечения поглощения Er, что позволяет снизить общую массу Gd в твэле и уменьшить эффект блокировки. При расчете использовались концентрации Gd в пределах 1,5% и 3%, а концентрации Er использовались в диапазоне 0,1–0,6%.

Ключевые слова: ВВЭР, выгорающий поглотитель (БА), избыточная реактивность, гадолиний, эрбий, выгорание, ТВС, запас реактивности.

Для цитирования: Рахман А.С.К., Увакин М.А., Хоссен М.М. Исследование комбинированных вариантов размещения выгорающих поглотителей Er и Gd в тепловыделяющих сборках реакторов ВВЭР для оптимизации процесса выгорания.. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1): 76–84. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-10>

For citation: Rahman A.S.K., Uvakin M.A., Hossen M.M. Burnable absorber element (Gd and Er) use in the WWER-type reactor to increase the refueling time. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):76-84 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-10>


Burnable absorber element (Gd and Er) use in the WWER-type reactor to increase the refueling time

Anisur S.K. Rahman¹  , Maksim A. Uvakin² , Muhammed M. Hossen³ 

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

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

³ Bangladesh Atomic Energy Commission, E-12/A Agargaon, Dhaka-1207, Bangladesh

 ranisur01@gmail.com

Abstract. In a WWER-type pressurized water reactor, high-neutron-absorbing materials can compensate for the excess reactivity. Theoretical and computational analyses were conducted in this article to use burnable absorbers placed in a fuel rod to reduce the reactivity margin for extending refueling time for WWER-type reactors. To investigate the reduction of the reactivity margin, the fuel burnup calculation was performed without a burnable absorber and with a combination of a variety of burnable absorbers, namely natural Gadolinium (Gd) and Erbium (Er), applying a simplified GETERA program. The calculation found that the variation of the quantity of the burnable absorber (Gd, Er) inside the fuel assemblies governs the reactivity margin for the fuel burnup and increases the efficiency of Uranium fuel (UO₂). The combined use of Gd and Er leads to a smoother decrease in reactor reactivity due to a smaller Er absorption cross section, which makes it possible to reduce the total mass of Gd in the fuel element and reduce the blocking effect. In the calculation, Gd concentrations employed in the computation at 1.5% and 3%, while Er concentrations were used within the range of 0.1%–0.6%.

Keywords: WWER, burnable absorber (BA), excess reactivity, gadolinium, erbium, burnup, fuel assembly, reactivity margin.

1. Introduction

Presently, WWER-type reactors use partial refueling with extensive campaigns that last 1.5 years, and then it is possible to switch to 2-year campaigns. Ensuring such campaigns necessitates an increase in fuel enrichment, which increases the initial reserve reactivity of the fuel load and therefore needs to compensate the operating system for excess reactivity. This system incorporates a burnable absorber system which is built into the fuel matrix along with a liquid system based on the decomposition of absorber in the coolant. The magnitude and sign of the density coefficient reactivity as well as the volume of low-level liquid radioactive waste at nuclear power plants are adversely affected by the use of a liquid system with a large reactivity margin. Furthermore, liquid radioactive waste management may require further financial outlay. The use of burnable poisons incorporated into the fuel can decrease these negative consequences extensively by increasing the period of the campaign. In WWER-type reactors, strong burnable absorber «gadolinium» is located in the fuel assemblies in the form of oxide (Gd_2O_3), the concentration varies within 5-8% by weight [1-3]. Gadolinium has time to burn up during the first campaign due to the high absorption cross section. This means that it has no impact on the typical unloaded fuel burnup. It is important to note that as the weight of Gadolinium in the fuel increases, the thermal conductivity of the fuel rod decreases, leading to fuel cracking and the release of fission products. Erbium, a less effective neutron absorber and the concentration varies within 0.4-0.7%. The use of Erbium in PWRs has many potential advantages over Gadolinium. The melting point of Er_2O_3 is 2355°C. The Er_2O_3 loading optimization process is similar to Gd_2O_3 . Erbium is characterized by a lower total absorption cross section compared to other BAs. The smaller absorption cross section of Erbium provides a relatively soft redistribution of power after its consumption; this generally allows favorable power peaking factor (PPF) to be achieved in Erbium-fueled cores with relatively simple in-assembly and core loading schemes. However, Erbium also results in decreased reactivity per cycle length. So, hybrid BA design of a PWR assembly with a thin layer of Er deposited around Gadolinium-containing fuel pellets has been used to control reactivity by reducing the Gadolinium content and increasing the UO_2 fuel volume.

2. Formulation of the problem

For the partial refueling of the WWER reactor with burnable absorber (BA), a simplified model is used. Firstly, overloads except reconfiguration of fuel assemblies are counted. So, in the active zone repeating forms are built, component of fuel assemblies with several duration of irradiation. It is considered that these shapes for the polycells in the active zone. The multiplying coefficient of this polycell is described as the arithmetic mean of the multiplication values of each specific fuel assembly. It is considered that TVS (FA) consists of individual polycells, in the middle of this poly-cells there is a tweg (UO_2+Gd), and around is the number of fuel rods [4,5]. A full-scale fuel assembly (FA) consists of 331 rods. Among them 285 or 306 fuel rods, 27 or 6 fuels with absorber rods, 18

guide channels and 1 central rod Fig-2. Consequently, the multiplication coefficient for the fuel assemblies and the selected polycells will be the same. Hexagonal structure is considered for the calculation polycells that forming one or two fuel rods. The length of the fuel campaign of a polycell is selected based on the state of the MC (multiplication coefficient) from TVS (FA), that is equal to the critical value, which is accepted from the leakage of neutron values. The purpose of this investigation is to minimize the proportion of excess reactivity, that compensated with the fluid control system, with the varying of fuel rods and the content of absorber (Gadolinium and Erbium). In these circumstances, the amount of low-level radioactive waste (LRW) of WWER-type reactors is significantly reduced.

3. Computational Analysis

The calculations were carried out the program of GETERA is formed for neutron-physical calculation of the cells and poly-cells in the nuclear reactors. This program may be used to solve different kinds of problems: formulation of small-molecule cross sections for accounting large-scale formations, investigation of different characteristics of nuclear reactors in cell and poly-cellular models, calculation of problems such as- burnup of fuels, multiplying coefficient, modeling of various reactor regimes etc. The neutron-physical distribution of neutrons is calculated by the first collisions probability method [6,7].

By using the program GETERA the compensation of the reactivity margin for the fuel with absorber (UO_2+Gd) rod was calculated. For this purpose, the following method was considered.

1. Here, considered WWER reactor fuel assembly with enrichment of fuel $\approx 4.95\%$.

2. Each fuel (UO_2) rod and Fuel + Gadolinium (UO_2+Gd) rod is divided into four zones, which are shown in figure 1. First zone, which contains fuel. Second zone, contains the shell. The third zone is coolant, and the fourth zone is moderator.

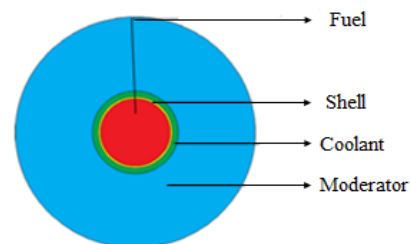


Figure 1. Pin cell

3. The distinguished element of periodicity is moved by a ring system component of fuel (Uranium) layers, cladding of fuel rod and coolant layers. GETERA program was implemented in this model.

4. Load changing of Gd in the fuel rod about 1.5-8% (by weight), the dependence $K_{\infty}^{TBC}(t)$.

5. Load changing of Er in the fuel rod about 0.1-0.7% in the triple company.

6. Assuming a threefold partial overload, we find the duration reactor campaign for each dependence according to formula (1):

$$K_{\infty}^{POLY}(t) = \frac{K_{\infty}^{TBC}(t) + K_{\infty}^{TBC}(T+t)K_{\infty}^{TBC}(2T+T)}{3}. \quad (1)$$

End of the fuel campaign $K_{\infty}^{POLY}(t) = K_{\infty}^{CRIT}(t)$ is approximately 1.05 from the above equation. All designations are introduced below:

$K_{\infty}^{POLY}(t)$ – for the polycell multiplication coefficient;

$K_{\infty}^{CRIT}(t)$ – multiplication coefficient for the fuel assemblies;

$K_{\infty}^{CRIT}(t)$ – critical multiplication coefficient;

In the view of computational result analysis two options is considered in here, figure 2 shows the location of large number of fuel rods and a smaller number of absorber rods (306:6) and (285:27).

4. Analysis of the results

Firstly in here calculated the multiplying coefficient $K_{\infty}^{TBC}(t)$ vs time for the fresh fuel (without absorbers) and then calculated multiplying coefficient $K_{\infty}^{TBC}(t)$ vs time for the above two variants 306:6 and 285:27 and shown in the (fig. 3).

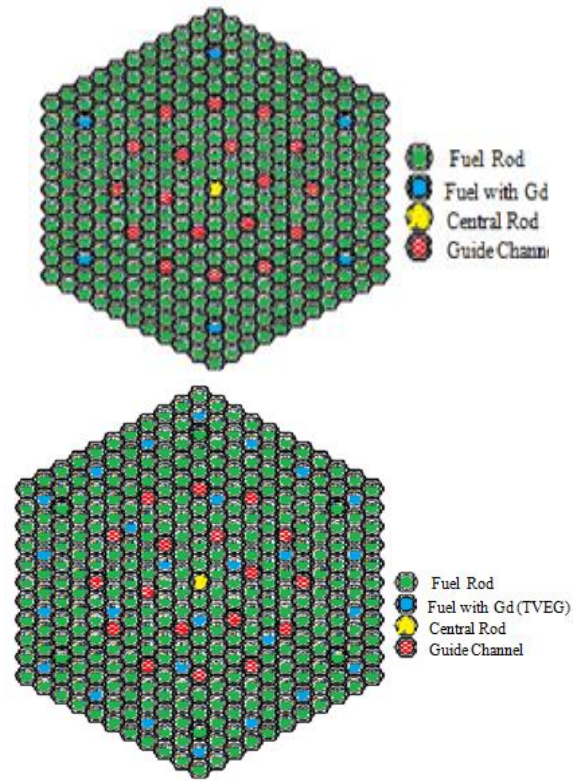


Figure 2. Arrangement of fuel elements in the fuel assembly's type (306:6) and 285:27

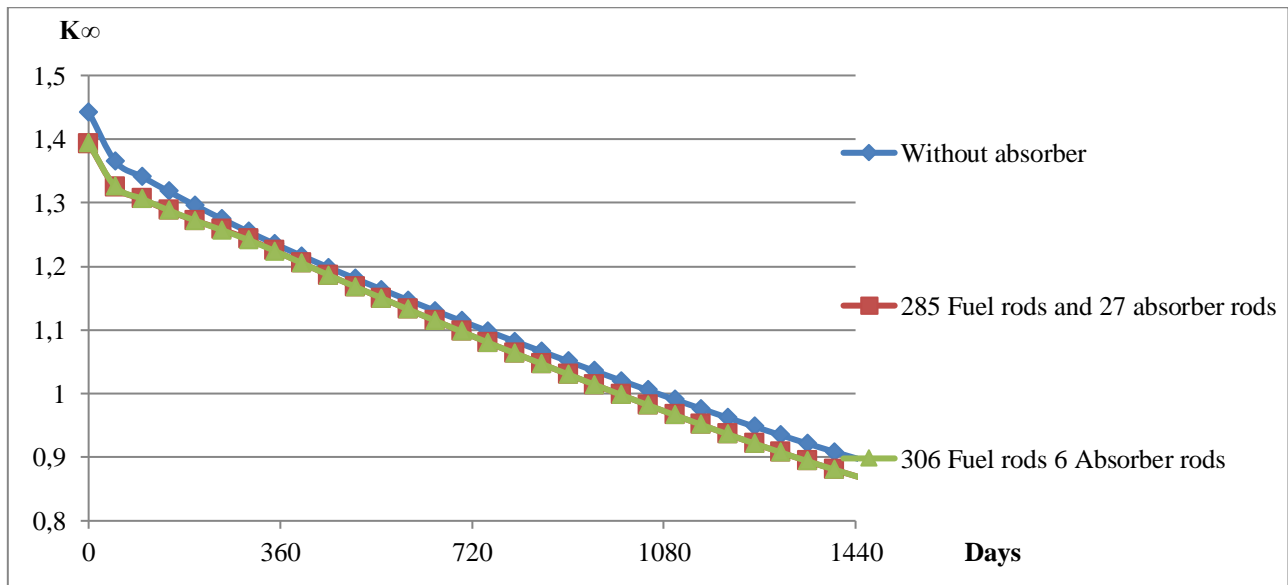


Figure 3. Multiplication coefficient vs Days of without an absorber and with absorber for the assembly 285:27 and 306:6

It is seen from Figure 3, the multiplication value of $K_{\infty}^{TBC}(t)$ without absorber is greater than the value of 306:6 and 285:27. In here for the variant 306:6 and 285:27 have 6 and 27 fuel with gadolinium rods respectively. But when more gadolinium rods in the fuel then absorbed more neutrons.

Without burnable absorber the period of a one campaign with a triple refueling was 1.5 years. Consider the case for the fuel assembly 306:6 and the Gadolinium weight content in TVEG (UO_2+Gd) is 3%, 4% and 5% respectively. In this condition, each TVEG (UO_2+Gd) can

be played as a control rod (strong absorber) and consequently depend on the change of $K_{\infty}^{TBC}(t)$ will be closer to linear (fig. 4). The more Gadolinium in the twveg, the lower initial value and, at the same time, the unloaded fuel burnup is practically does not change. In here especially noted that, the weight load of Gadolinium of 8%, for $K_{\infty}^{TBC}(t)$ which during the first campaign there is fuel and Gadolinium burnup at about the same rate $K_{\infty}^{TBC}(0) = K_{\infty}^{TBC}(T)$.

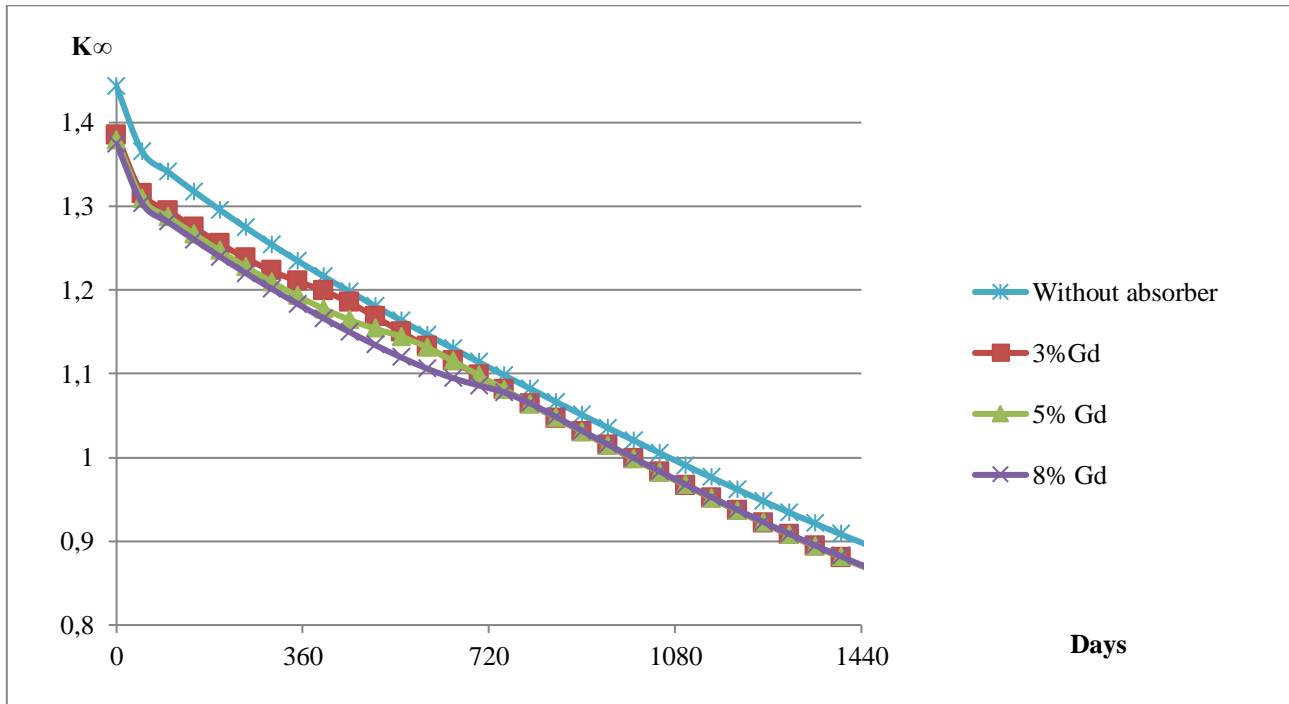


Figure 4. Multiplication coefficient of FA $K_{\infty}^{TBC}(t)$ vs Days in the case of fuel rods: fuel with absorber rods (306:6) for different concentration of Gadolinium

It is understood that, as a burnable absorber of Gadolinium effect on the fuel burnup. With increasing the concentration of Gadolinium in the fuel campaign, so for the concentration with 8% of Gadolinium campaign was 750 days. For the options 5% and 3%, the campaigns were 550 and 450 days, respectively, then lower the Gadolinium concentration, it is very fast unblocked. At the content of 3% Gadolinium, practically burned out after 450 days, and then the graph $K_{\infty}^{TBC}(t)$ corresponded with the graph of

without burnable absorber. The same indicator for 5% and 8% content was 550 days and 750 days, respectively.

For the case when the fuel rod is enclosed by a layer of UO_2 fuel elements (variant 285:27) so, the preliminary value of $K_{\infty}^{TBC}(t)$ decreases significantly, after that the Gd (Gadolinium) is intensively unblocked and then the multiplying coefficient $K_{\infty}^{TBC}(t)$ dependence start to increase in (fig. 5). Figure 6 shows the same dependences for the case when the same content of Erbium (Er) without Gadolinium (Gd) is loaded into each fuel element.

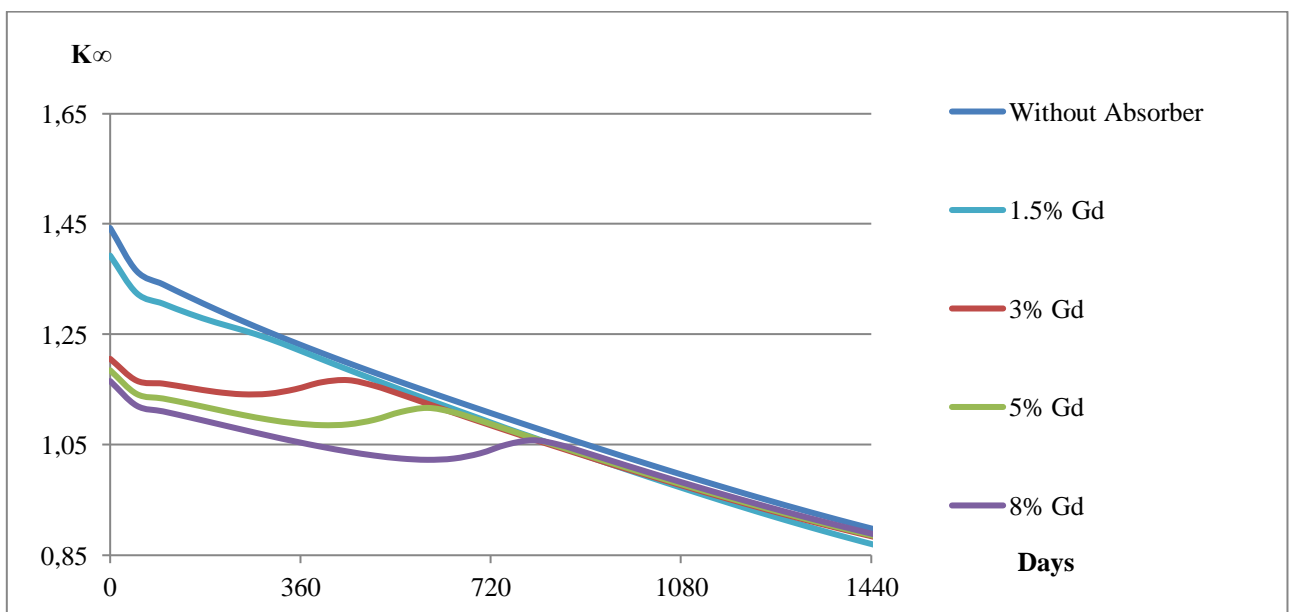


Figure 5. Multiplication coefficient of FA $K_{\infty}^{TBC}(t)$ vs Days in the case of a large number of Gadolinium fuel rods (285:27) for different concentration of Gadolinium

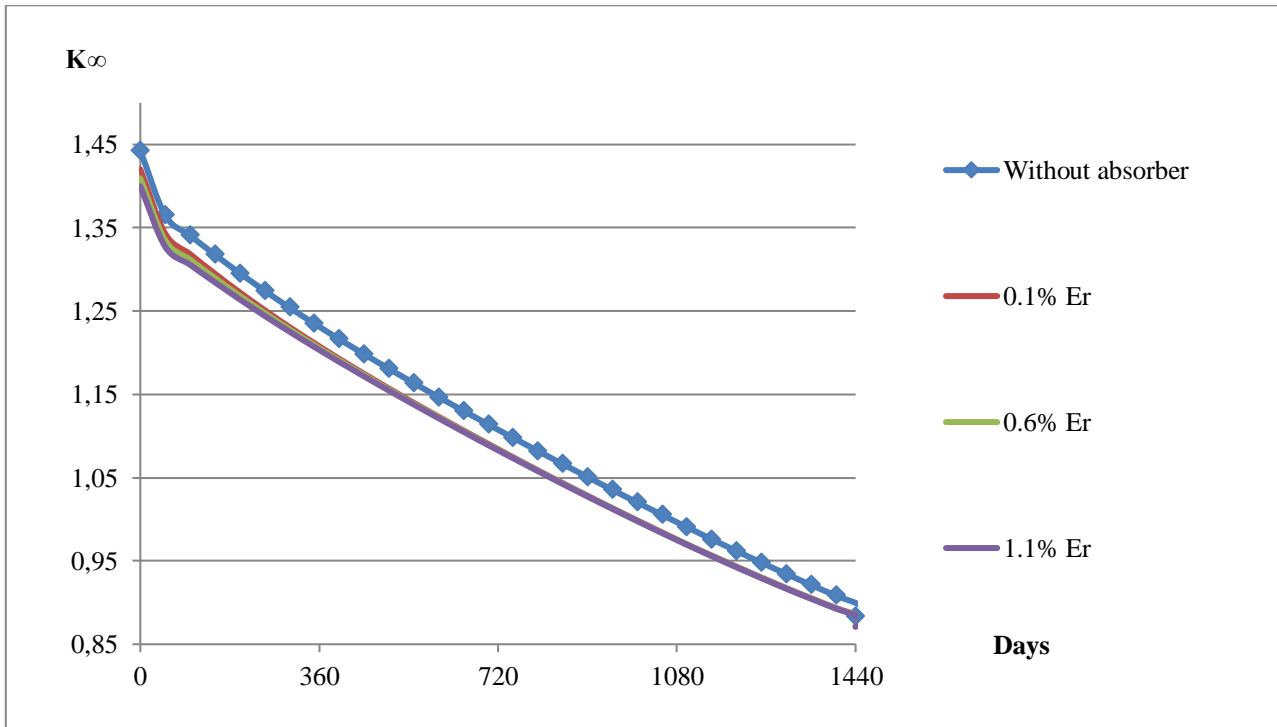


Figure 6. Multiplication coefficient of FA $K_{\infty}^{TBC}(t)$ vs Days in the case of different concentration of Erbium

To calculate the residual margin of reactivity, that is necessary compensating with a liquid system, calculations were made of the change in the value of $K_{\infty}^{POLY}(t)$ per campaign (fig. 7-9). The depletion was carried out at a constant power of approximately 18.00 MW (average power of one fuel assembly, $(P_{f.a.}=3200/163)$). For greater accuracy, small burn-up steps were used at the beginning of each cycle to build equilibrium concentrations of most fission product isotopes. Under these conditions, the fuel assembly was worked out over three reactor cycles, each cycle consisting of 480 effective days at full power with 16 MWt.day/kg burnup stages in each cycle.

The following model was developed to describe the effect of partial fuel assembly refueling into the core or burnout of one assembly in the core in three cycles. At first, refueling without rearrangement of fuel assemblies was considered. In this case, a multi-element in the core can be defined as fuel assemblies with different irradiation durations. Second, in the simplest case, the multiplication factor of a polycell is equal to the arithmetic mean of the entire set of fuel assemblies forming the cell.

In this case, the change in the infinite multiplication factor of a polycell with time can be represented by the equation (1):

$$K_{\infty}^{POLY}(t) = \frac{K_{\infty}^{f,a}(t) + K_{\infty}^{f,a}(t+T) + K_{\infty}^{f,a}(t+2T)}{3} \quad (1)$$

The duration of the life cycle of the nucleus is determined from the condition that at the end of the cycle the average multiplication factor of the poly-cell is equal to the critical value, which provides the value and it is approximately 1.05, as shown in equation (2):

$$K_{\infty}^{POLY}(t) = \frac{K_{\infty}^{f,a}(t) + K_{\infty}^{f,a}(t+T) + K_{\infty}^{f,a}(t+2T)}{3} = 1.05 \quad (2)$$

For a variant (285:27), when the number of fuel rods is 285, then the dependences are approximately similar as like without an absorber variant (Fig.7). With increasing the burnable absorber Gd in the fuel rods reducing the value of excess reactivity as a result of a decrease in the value of $K_{\infty}^{POLY}(t)$. This means the maximum excess reactivity margin is at the beginning of the fuel campaign.

In the case of with the large number of fuel rods, depend on $K_{\infty}^{POLY}(t)$ has a basically several character, such as parabolic dependence. This causes the maximum remaining reactivity margin to shift in time from the start of the campaign. It is a small value, the more absorber (Gd) in the fuel (UO₂) rods, as this also takes place in the case of a fewer number of UO₂ fuel rods. So, increasing of absorber (Gd) in the fuel rods reduces the burnup, for this reason the larger extent fuel (fig. 8).

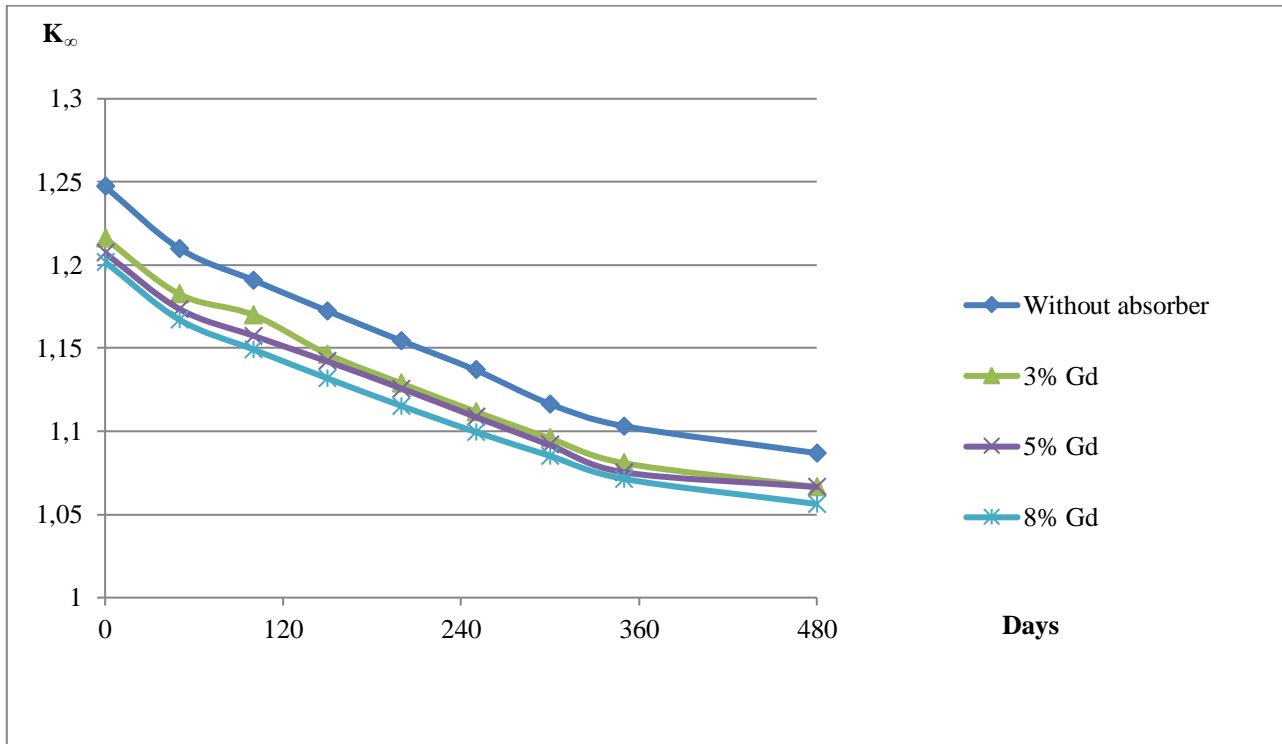


Figure 7. Multiplication coefficient of poly cells $K_{\infty}^{POLY}(t)$ vs Days in the case of fewer absorber (Gd) fuel rods (306:6) in one (480 days) campaign

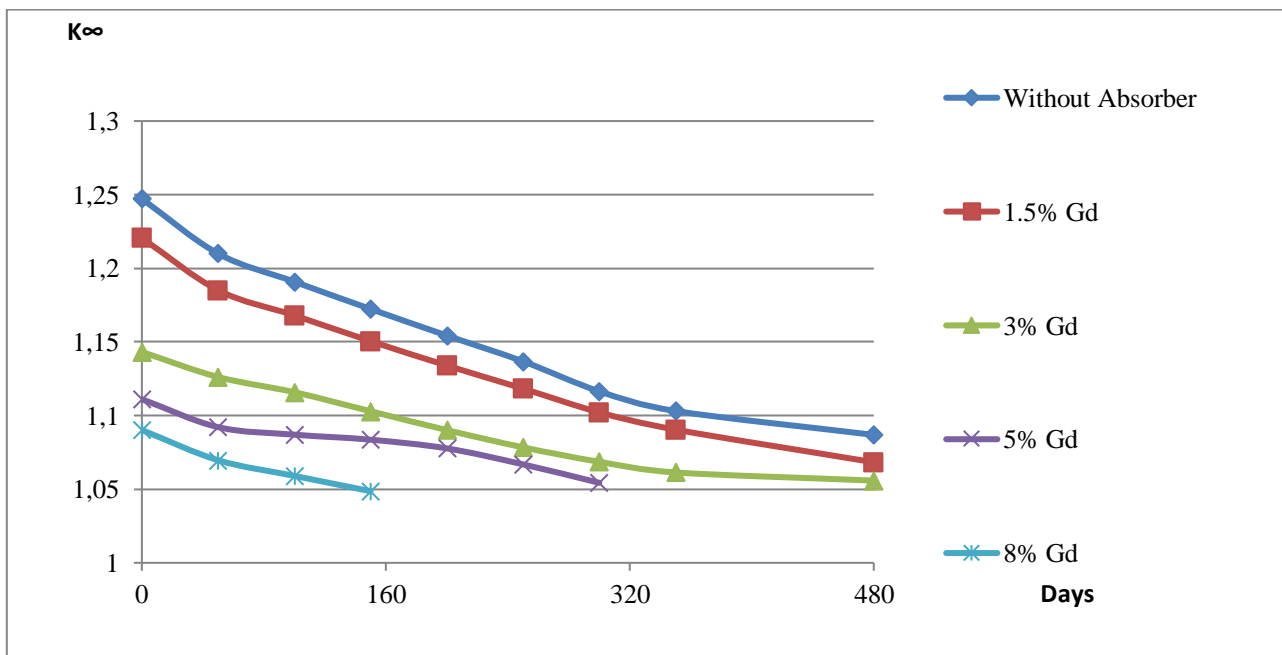


Figure 8. Multiplication coefficient of poly cells $K_{\infty}^{POLY}(t)$ vs Days in case of a large number of absorber (Gd) fuel rods (285:27) in one (480 days) campaign

When replacing absorber Gadolinium (Gd) with Erbium (Er), it may be placed in all (UO_2) fuel rods, in this case, a uniform loading of fuel assemblies is formed. So, the burnup calculation may be carry out on one elementary cell, or in a layered macro-cell to replace fuel rod on a fuel rod with Erbium. Figure 9 shows graphs of dependence $K_{\infty}^{POLY}(t)$ for various weight contents of Erbium in

UO_2 rods. Erbium absorber content in UO_2 fuel rods is varied in the range of 0.1-1.10% by weight. All these investigated results are almost linear character. Because Erbium is a weak absorber, so increasing the absorber Erbium content in fuel UO_2 components that quickly reduces the fuel burnup.

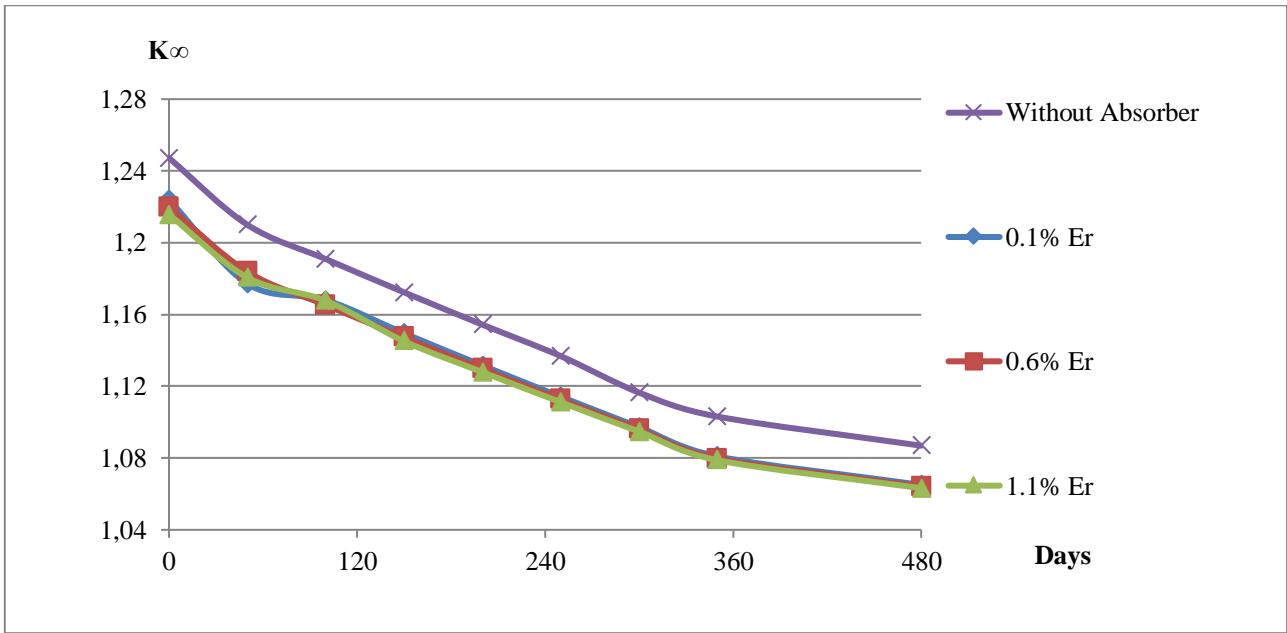


Figure 9. Multiplication coefficient of poly cells $K_{\infty}^{POLY}(t)$ vs Days for erbium in one campaign with 3-foldrefueling

Although all absorber has benefits and drawbacks, and none of them has disproportionate advantage, it is perfectly acceptable to use mixed options, sometime little bit of Erbium in fuel elements is mixed with Gadolinium. In the time of computational analysis, relatively small amount of

Gadolinium concentrations were 1.5% and 3%, while the absorber (Er) content difference between 0.1–0.6%. These variable concentrations, in here calculated for the option with the number of fuel rods (285:27) is optimal. The calculation result is shown in figure 10.

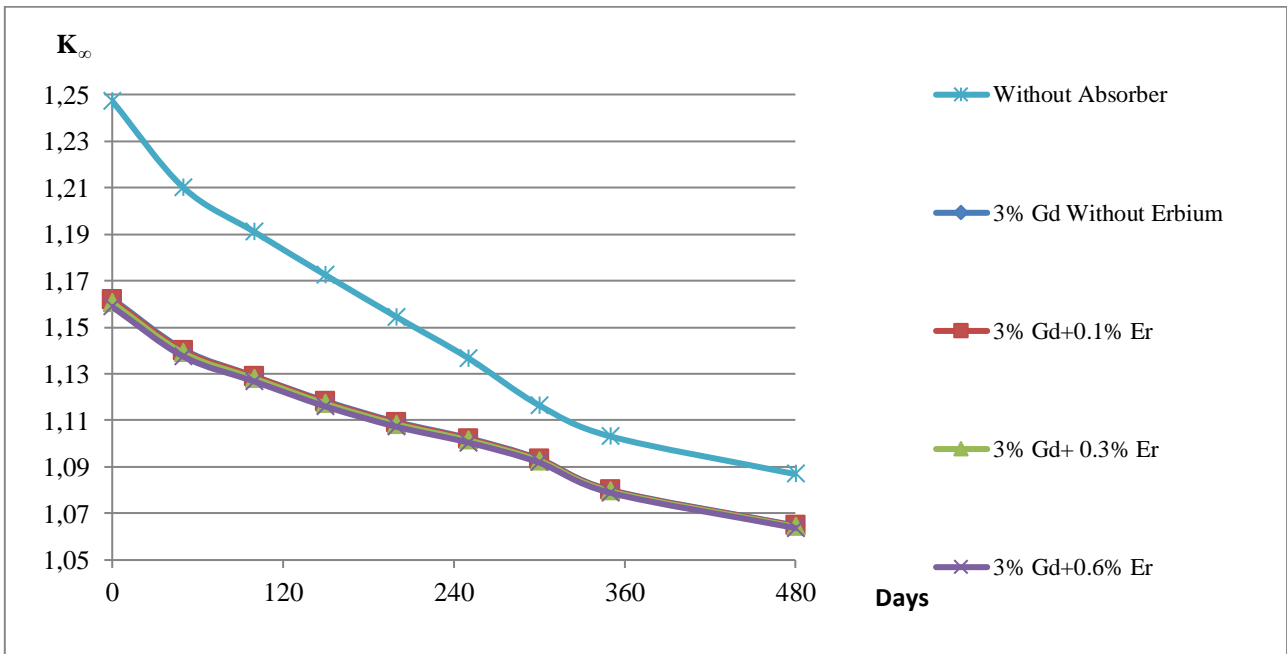


Figure 10. Multiplication coefficient of poly cells $K_{\infty}^{POLY}(t)$ vs Days for the two mixed burnable absorbers (Gd+Er) in a campaign at 3-fold refueling

5. Discussion of the results

In here, reactivity calculated by using formula by the formula (3):

$$p = \frac{\max K_{\infty}^{POLY}(t) - K_{\infty}^{CRIT}}{\max K_{\infty}^{POLY}} \quad (3)$$

All considered options are illustrated in Table 1 where $\max K_{\infty}^{POLY}(t)$ is the polycell’s maximum multiplication factor.

Table 1. Calculated result of uncompensated reactivity for the all considered options are shown below

№	Variant	max $K_{\infty}^{POLY}(t)$	K_{∞}^{CRIT}	ρ %
1	Without absorber	1.44	1.05	27%
Variants with fewer TVEG (Fuel+Gd) 306:6				
2	3% Gd	1.380	1.050	24%
3	5% Gd	1.370	1.050	23%
4	8% Gd	1.360	1.050	22%
Variants with a large number of TVEG (Fuel+Gd) 285:27				
5	1.5% Gd	1.390	1.050	24%
6	3.0% Gd	1.235	1.050	14.9%
7	5.0% Gd	1.180	1.050	11%
8	8.0% Gd	1.160	1.050	9%
Erbium Options				
9	0.10% Er	1.420	1.050	26%
10	0.30% Er	1.415	1.050	25.7%
11	0.60% Er	1.409	1.050	25.5%
Variants with a large number of TVEG (Fuel+Gd) 285:27 with mixed absorbers				
12	3.0% Gd+0.10% Er	1.23361	1.050	14.8%
13	3.0% Gd+0.30% Er	1.23094	1.050	14.7%
14	3.0% Gd+0.60% Er	1.22720	1.050	14.4%

Figure 10 clearly shows that at the time of 480 days of burnout, the difference for the option with boron and the option with burnable poisons (BP) in Kef is significantly less than at the beginning. So usage of BP makes it possible to achieve approximately the same energy output with reduced volumes of water exchange. This improves the operational performance of nuclear power plants.

For the fuel enrichment of $x=4.95\%$ the reactivity is approximately 27% and it is considered for the triple refueling. The uncompensated reactivity margin, which makes the total reactivity margin for burnup for options with two layers of absorber, that has a weak relationship with the weight content of Gadolinium in the fuel rods.

The uncompensated reactivity margin declines with an increase in the number of absorber rods in fuel assemblies (306:6) to (285:27) and decreases 24% to 14.9% for the 3% of Gadolinium. In the table also shows that, 12% of the total reactivity margin uncompensated in the moment of 5% Gadolinium absorber. The lowest value for uncompensated reactivity margin when employing Erbium as a burnable absorber of the overall reactivity at a weight content of 0.6% Erbium in fuel components.

6. Conclusion

From the viewpoint of extending refueling time for WWER-type reactors, theoretical and computational analyses were conducted in this study to use burnable absorbers placed in a fuel rod to reduce the reactivity margin. By applying GETERA program, the calculation was performed without a burnable absorber and with a combination of a variety of burnable absorbers, namely natural Gadolinium and Erbium.

Calculation results showed that varying the amount of the burnable absorber (Gd, Er) inside the fuel assemblies makes it possible to control the reactivity margin for the fuel burnup and increase the efficiency of nuclear fuel (UO_2) usage in the WWER reactors. The combined use of Gadolinium and Erbium reduces the loss in reactor reactivity because of the incomplete combustion of Erbium and the significant reduction of the weight in the content of Gadolinium in the fuel rod, which will not necessitate a decrease in fuel enrichment in twegs (Fuel+Gd). In the computational calculation, Gadolinium concentrations were used as 1.5% and 3%, while the Erbium content was in the range between 0.1%–0.6%.

REFERENCES

1. Rahman S.K. Anisur, Uvakin M.A. Compare the Result of Uncertainty Analysis in the Physical Calculations of WWER Cells in the Daily Maneuvering Schedule by GETERA and WIMS Programs. *Global nuclear safety*. 2019;1(30):90–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/GNS-2019-01-09>
2. Anisur R.S., Uvakin M.A. Investigation of Absorber Concentration Changes During Maneuvering Operation in WWER1000 Reactor. *Global nuclear safety*. 2020;(2):83–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2020-02-06>
3. Rahman S.K. Anisur, Uvakin M. A. Uncertainty analysis in the physical calculation of WWER cells in the daily maneuvering schedule. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1133(1):012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1133/1/012048>
4. Abu Sondas M.A., Demin V.M., Savander V.I. Comparison of the effect of burnable absorbers (Gd and Eu) on the Neutron-Physical Characteristics of VVER-1000 Fuel Assemblies. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2019;8(3):199-205. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S2304487X19030027>
5. Abu Sondas M.A., Demin V.M., Savander V.I. Decrease the volume of boric regulation of the reactivity when using the burnable absorber on the basis of (GD2O3) in the fuel reactor WWER-1200. *Global nuclear safety*. 2019;3(32):56–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/GNS-2019-03-06>
6. Belousov N.I., Bychkov S.A., Pryanichnikov A.B. Use of the method of first collision probabilities for calculation of reactor cells with complex geometry. *Engineering physics*. 2002;4:15–18. (In Russ.) Available at: <http://infiz.tgizd.ru/ru/arhiv/4240> (accessed: 28.07.2023).

7. Bryukhin V.V., Kurakin K.Y., Uvakin M.A. Analysis of the uncertainties in the physical calculations of water-moderated power reactors of the WWER type by the parameters of models of preparing few-group constants. *Physics of atomic nuclei*. 2016(79):1305–1314. <https://doi.org/10.1134/S1063778816080044>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Рахман А.С.К. – выявление и исследование факторов, требующих дополнительных исследований и принятия компенсирующих мер для решения проблем, написание текста статьи;
Увакин М.А. – концепция и качественная разработка исследования;
Хоссен М.М. – изучение тематического материала, систематизация информации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Анисур С.К. Рахман, старший научный сотрудник, Управление по регулированию атомной энергии Бангладеш (БАЭРА), Агаргаон, Дакка-1207, Бангладеш.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-8234>

WosResearcher ID: D-3381-2019

e-mail: ranisur01@gmail.com

Максим Александрович Увакин, кандидат физико-математических наук, доцент, НИЯУ МИФИ, г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4917-1770>

e-mail: uvakin_ma@grpress.podolsk.ru

Мухаммед Муфаззал Хоссен, главный научный сотрудник, Комиссия по атомной энергии Бангладеш (БАЭС), Агаргаон, Дакка-1207, Бангладеш.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8328-0092>

e-mail: mufa50du@yahoo.com

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Rahman A.S.K. – identification and researching factors requiring further research and the implementation of compensatory measures to address issues writing the text of the article;
Uvakin M.A. – conceptualization and qualitative research design;
Hossen M.M. – study of thematic material, systematization of information, results analysis.

FUNDING:

The study had no external funding.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Anisur S.K. Rahman, Senior Scientific Officer (SSO) Bangladesh Atomic Energy Regulatory Authority (BAERA), Authority Bhabon, E-12/A, Agargaon, Dhaka-1207, Bangladesh.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7803-8234>

WosResearcher ID: D-3381-2019

e-mail: ranisur01@gmail.com

Maksim A. Uvakin, Cand. Sci. (Phys. Math.), Associate Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4917-1770>

e-mail: uvakin_ma@grpress.podolsk.ru

Muhammed M. Hossen, Principal Scientific Officer (PSO), Bangladesh Atomic Energy Commission, E-12/A Agargaon, Dhaka-1207, Bangladesh.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8328-0092>

e-mail: mufa50du@yahoo.com

Поступила в редакцию 22.08.2023

После доработки 19.02.2024

Принята к публикации 22.02.2024

Received 22.08.2023

Revision 19.02.2024

Accepted 22.02.2024


ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 004.021:621.874:621.311.25
<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-11>
EDN WJOWIU
Оригинальная статья / Original paper



**Разработка оптимального алгоритма работы механизма поворота
телевизионной штанги машины перегрузочной**

Рябов А.О., Цуверкалова О.Ф.  

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

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оптимизации работы механизма поворота телевизионной штанги машины перегрузочной при проведении перегрузочной кампании в периоды планового предупредительных ремонтов на АЭС. Рассматриваемая задача состоит в том, чтобы минимизировать затраты времени на повороты телевизионной штанги при проведении перегрузочной кампании для экономии времени и денежных средств на проведение технологических операций, и, тем самым, сократить время простоя энергоблока АЭС. Приводится описание конструкции и назначения рабочей зоны, машины перегрузочной и других объектов, участвующих в технологических операциях. Во всех участках рабочей зоны есть определенное количество «проблемных» ячеек, в которых могут возникнуть помеха и/или блокировка поворота телевизионной штанги. Выявлены точное расположение всех «проблемных» ячеек и допустимые для них углы перемещения и наблюдения. Список операций представлен в качестве таблицы, содержащей: номера операции, маркировки соответствующего кластера, а также первоначального и целевого положения в координатах. Таблица дополнена картограммой с координатами и маркировками ячеек. Рассчитано, сколько времени занимает поворот из одного допустимого угла наблюдения в другой. Проведен пример расчета времени для операции с машиной перегрузочной.


Ключевые слова: телевизионная штанга, машина перегрузочная, оптимизация, АЭС, алгоритм, ТВС, реактор, углы наблюдения, стеллажи, ячейки.

Для цитирования: Рябов А.О., Цуверкалова О.Ф. Разработка оптимального алгоритма работы механизма поворота телевизионной штанги машины перегрузочной. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):85–92. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-11>

For citation: Ryabov A.O., Tsuverkalova O.F. Development of optimal operation algorithm for rotation mechanism of refuelling machine television rod. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):85-92 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-11>

**Development of optimal operation algorithm for rotation mechanism of refuelling machine
television rod**

Anton O. Ryabov, Olga F. Tsuverkalova  

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*
 oftsuverkalova@mephi.ru

Annotation. The paper examines the issues of optimizing the operation of the rotation mechanism of the television rod of the refuelling machine during the refueling campaign during the scheduled preventive maintenance at the NPP. The task under consideration is to minimize the time spent on turning the television rod during a reloading campaign in order to save time and money on technological operations, and thereby reduce the downtime of the nuclear power plant unit. A description of the design and purpose of the work area, the refuelling machine and other objects involved in technological operations is provided. In all parts of the working area there is a certain number of «problem» cells in which interference and/or blocking of rotation of the television rod may occur. The exact location of all «problem» cells and the permissible angles of movement and observation for them are revealed. The list of operations is compiled as a table containing: operation numbers, markings of the corresponding cluster, as well as the initial and target positions in coordinates. This table comes complete with a cartogram with coordinates and cell labels. It is calculated how long it takes to turn from one permissible viewing angle to another. An example of time calculation for an operation with a reloading machine is given.

Keywords: television rod, refuelling machine, optimization, NPP, algorithm, fuel assembly, reactor, observation angles, racks, cells.

В атомной энергетике достаточно часто приходится сталкиваться с решением задач маршрутизации, то есть с определением оптимальной последовательности выполнения определенных операций. Примерами таких задач могут служить оптимизация траектории перемещения работников в радиационно опасных зонах, оптимизация демонтажа радиоактивного оборудования при выводе из эксплуатации энергоблоков АЭС и другие.

Задачи такого рода включают большое число разнообразных ограничений и относятся к задачам дискретной оптимизации, традиционно считающимся труднорешаемыми. Для решения задач маршрутизации различными авторами предлагалось использование таких методов, как метод итераций, задача коммивояжера, экстремальные задачи маршрутизации с ограничениями, динамическое программирование и другие [1–7].

Данная работа посвящена проведению исследования в области поиска оптимального алгоритма работы механизма поворота телевизионной штанги (ТШ) машины перегрузочной при проведении перегрузочной кампании во время плановых предупредительных ремонтов на АЭС. Целью работы является минимизация временных затрат на повороты ТШ при проведении перегрузочной кампании для экономии времени и денежных средств на проведение технологических операций, что позволит сократить время простоя энергоблока АЭС.

Несмотря на то, что данная задача относится к задачам маршрутизации, методы и алгоритмы, приводимые в упоминавшихся выше работах, не учитывают специфику работы машины перегрузочной (МП), что не позволяет использовать их в полной мере при решении поставленной задачи. В частности, алгоритм, использующийся сейчас в АО «Атоммашэкспорт»¹, не учитывает весь набор операций выгрузки и перегрузки с МП (что может составлять до сотен операций), а потому для каждой операции расчет начинается сначала без учета последующих перемещений. В связи с этим было принято решение о разработке эвристического алгоритма, который позволил бы учитывать указанные особенности.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- изучить конструкцию и назначение рабочей зоны, машины перегрузочной и других объектов, участвующих в технологических операциях;
- выявить ограничения задачи и характеристики объектов; изучить последовательности выполнения технологических операций;
- уточнить и дополнить изученные характеристики и определить размеры всех необходимых элементов рабочей зоны;

– выявить точное расположение всех участвующих ячеек и допустимые для них углы перемещения и наблюдения;

– провести расчет времени для операции с машиной перегрузочной.

Приведем краткое описание предметной области.

ТШ входит в состав машины перегрузочной (МП), которая представляет собой сложный робототехнический комплекс и состоит из следующих частей:

1) моста, включая металлоконструкцию, привод передвижения, ходовую часть и площадки обслуживания;

2) тележки, включая металлоконструкцию, привод передвижения, ходовую часть, привод поворота штанги рабочей, привод поворота штанги телевизионной, привод подрыва и площадки обслуживания;

3) штанги рабочей (РШ) с захватом тепловыделяющей сборки (ТВС) и захватом поглощающего стержня системы управления и защиты (ПС СУЗ);

4) блока приводов штанги рабочей;

5) штанги телевизионной, включая штангу телескопическую и привод;

6) пути рельсового;

7) привода подрыва.

В перечень задач ТШ входят:

1) осмотр посадочных мест ТВС в реакторе;

2) осмотр поглощающего стержня системы управления и защиты (ПС СУЗ);

3) осмотр наружных поверхностей ТВС и ПС СУЗ, а также их маркировки;

4) контроль за работой захвата ТВС рабочей штанги;

5) осмотр рабочей зоны.

Выделим основные объекты, существенные для решения оставленной задачи. Для этого составим упрощенную схему рабочей зоны на АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 (рис. 1), в которой оперирует машина перегрузочная^{2,3}.

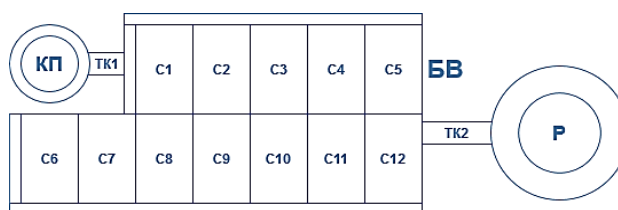


Рисунок 1. Схема рабочей зоны^{2,3}
Figure 1. Diagram of the working area^{2,3}

Рабочая зона состоит из нескольких участков: бассейн выдержки (БВ), реактор (Р), колодец перегрузки (КП) и два транспортных коридора (ТК1, ТК2). В бассейне выдержки находятся двенадцать стеллажей (С1, С2, ... С12) с ячейками для ТВС. Пример стеллажа с

¹ Оптимизированный алгоритм технологической операции «Перемещение на координаты перегружаемого изделия» СКА 6501.05.00.000 D15: Волгоград: АО «Атоммашэкспорт», 2012. – 17 с.

² Машина перегрузочная. Пояснительная записка. АМЕ 1625.00.00.000 ПЗ: Волгоград: АО «Атоммашэкспорт», 2021. – 67 с.

³ Машина перегрузочная. Руководство по эксплуатации. АМЕ 1625.00.00.000 РЭ: Волгоград: АО «Атоммашэкспорт», 2021. – 48 с.

опущенными над ним РШ и ТШ представлен на рисунке 2^{2,3}.



Рисунок 2. Пример стеллажа^{2,3}
Figure 2. Rack example^{2,3}

Стеллажи имеют несколько отличающуюся друг от друга структуру:

- С1 и С8 включают в себя 5 столбцов по 10 ячеек и 4 столбца по 9 (всего 86 на стеллаж);
- С2...С5 и С9...С12 включают в себя 4 столбца по 10 ячеек и 3 столбца по 9 (всего 67 на стеллаж);
- С6 и С7 включают в себя пеналы, а не ячейки – 6 столбцов по 4 (всего 24 на стеллаж).

Реактор же содержит в себе столбцы дважды по 6, 9, 10, 11, 12, 13 и 14 ячеек и один раз 13 ячеек в центре (всего 163 ячейки).

Обратим внимание, что в КП при заезде с градусом 0 или 180 разрешено вращаться, будучи только в центре, и после этого переходить к ячейке. Запрещено вращаться в движении. Ячейки в КП настраиваемы и различаются, что не позволяет определить его постоянную структуру.

ТШ при установке и извлечении ТВС должна находиться на угле 45, 135, 225, 315 градусов. При прохождении же через транспортный коридор угол должен быть 0 или 180 градусов, чтобы избежать столкновения со стенками коридора.

Во всех участках есть определенное количество «проблемных» ячеек. «Проблемными» будем называть те ячейки, у которых могут возникнуть помеха

и/или блокировка поворота ТШ. Как правило, это вызвано расположением ячейки возле стенки рабочей зоны, что не позволяет выполнить разворот на один из указанных углов.

В случае стеллажей с ячейками, чтобы не возникало проблем при повороте, ячейка, над которой осуществляется поворот ТШ, должна находиться в трех ячейках от стены, т.е. являться четвертой. То же самое касается и ячеек реактора. Безопасное расстояние для стеллажей с пеналами – 2 пенала от стены, т.е. позволяет вращение без проблем на 3 пенале.

Для «проблемных» ячеек укажем возможные углы в градусах перемещения ТШ в транспортном положении, а также введем цветовую индикацию для упрощения дальнейшей работы с ними. Составим новую схему с учетом всех ячеек и пеналов, как показано на рисунке 3:

- 0° или 180° (темно-серый цвет) – у транспортных коридоров;
- 90-180° (зеленый цвет) – у северо-западных углов;
- 0-180° (оранжевый цвет) – у северных сторон;
- 0-90° (желтый цвет) – у северо-восточных углов;
- 0-90° и 270-315° (красный цвет) – у восточной стороны;
- 0° и 180-315° (синий цвет) – у южных сторон;
- 90-270° (фиолетовый цвет) – у западных сторон;
- 0-315° (белый цвет) – у «непроблемных» ячеек и пеналов (без ограничений допустимых углов);
- 0° и 270-315° (лазурный цвет) – у юго-восточных углов;
- 180-270° (розовый цвет) – у юго-западных углов.

Далее составим схему с допустимыми для ТШ углами наблюдения (45°, 135°, 225° и 315°) (рис. 4):

- 45° (лазурный цвет) – юго-западный угол;
- 135° (синий цвет) – юго-восточный угол;
- 225° (зеленый цвет) – северо-восточный угол;
- 315° (красный цвет) – северо-западный угол.

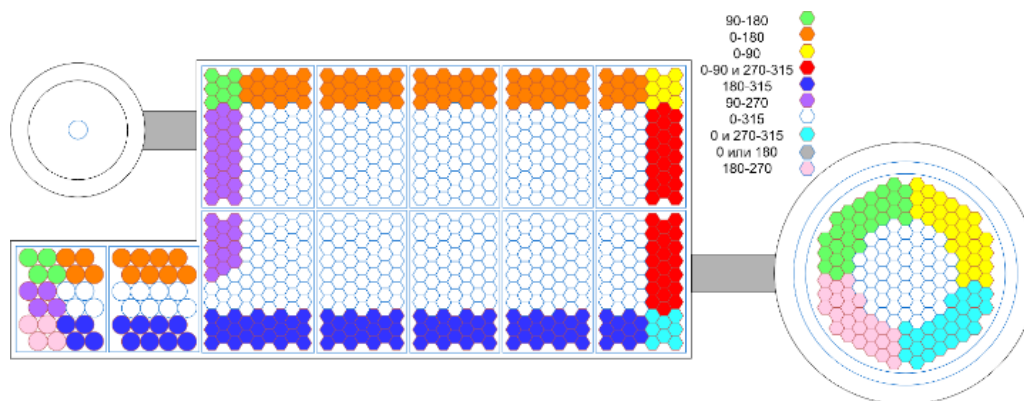


Рисунок 3. Схема рабочей зоны с углами перемещения
[составлено авторами]

Figure 3. Diagram of the working area with travel angles
[compiled by the authors]

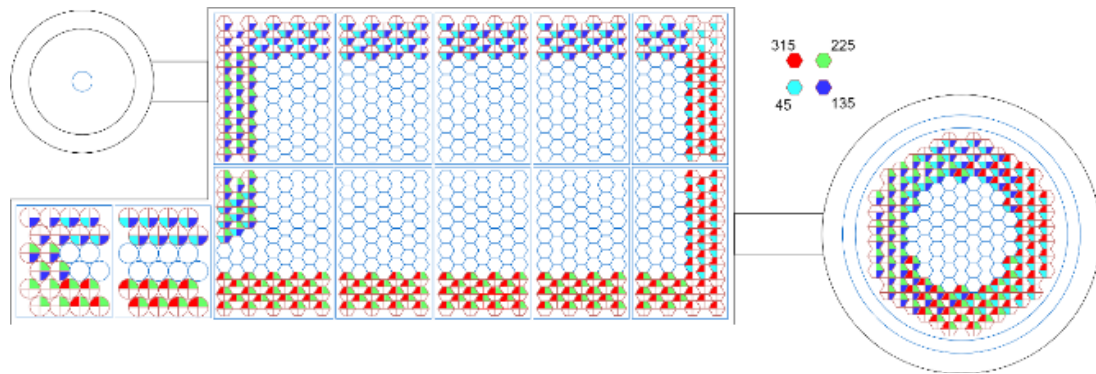


Рисунок 4. Схема рабочей зоны с углами наблюдения
[составлено авторами]

Figure 4. Diagram of the working area with observation angles
[compiled by the authors]

Список операций определяется заранее и известен алгоритму до начала выполнения, и выполняться эти операции должны в строгом порядке одна за другой. Это значит, что оператор не может изменять порядок этих операций для сокращения времени их выполнения. Как правило, на АЭС этот список операций, называемый рабочим графиком перегрузки, представляется в виде таблицы, содержащей номера операции,

маркировки соответствующего кластера, а также первоначального и целевого положения в координатах. С этой таблицей идет в комплекте картограмма с координатами и маркировками ячеек ⁴.

По образцу этих картограмм составим собственный набор картограмм для всех стеллажей и реактора. Представим пример такой картограммы на рисунке 5.

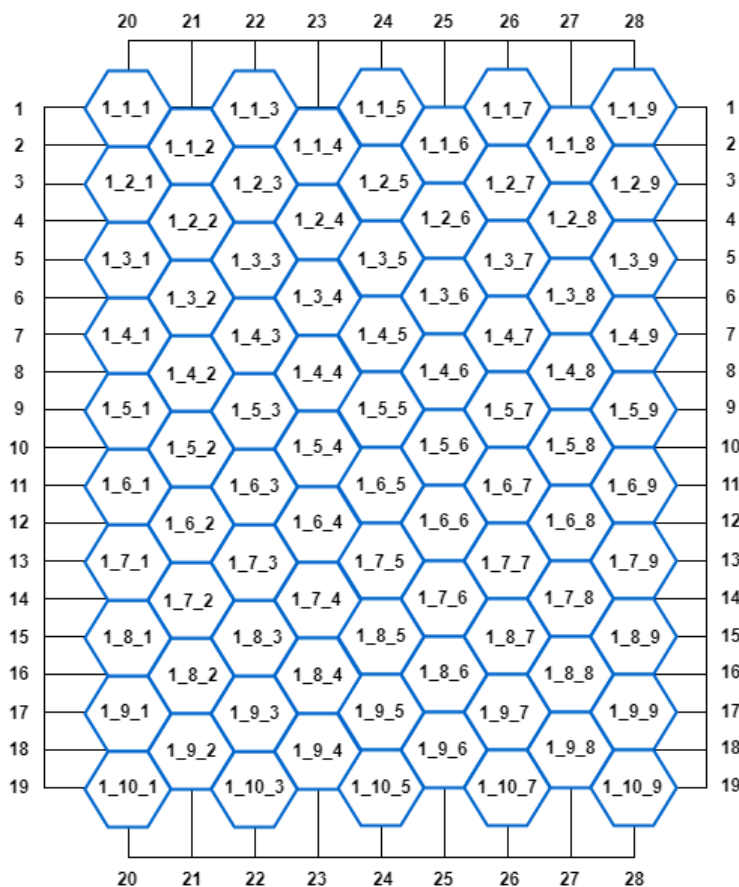


Рисунок 5. Картограмма стеллажа C1 [составлено авторами]

Figure 5. Cartogram of rack C1 [compiled by the authors]

⁴ Картограмма перегрузки топлива: Волгоград: АО «Атоммашэкспорт», 2012. – 9 с.

Ключевым элементом рассматриваемого алгоритма является механизм поворота ТШ. Поскольку скорость ее поворота известна, можно рассчитать сколько времени занимает поворот из одного допустимого угла наблюдения в другой, а также для углов 0° и 180° , так как они часто применяются при проходе через ТК1 и ТК2. Перенесем эти результаты в таблицу 1.

Таблица 1. Время поворота ТШ из одного угла в другой в секундах [составлено авторами]

Table 1. Time to rotate the television boom from one corner to another in seconds [compiled by the authors]

Углы, между которыми осуществляется поворот	0°	45°	135°	180°	225°	315°
0°	0	3,75	11,25	15	18,75	26,25
45°	3,75	0	7,5	11,25	15	22,5
135°	11,25	7,5	0	3,75	7,5	15
180°	15	11,25	3,75	0	3,75	11,25
225°	18,75	15	7,5	3,75	0	7,5
315°	26,25	22,5	15	11,25	7,5	0

Используя эти скорости, для удобства составим схему скоростей поворота ТШ, представленную на рисунке 6.

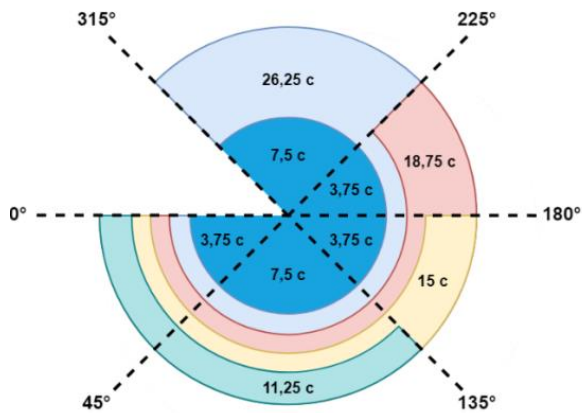


Рисунок 6. Схема скоростей поворота ТШ [составлено авторами]

Figure 6. Rotation speed diagram of the television boom [compiled by the authors]

Конкретный ходовой алгоритм МП таков:

1. Движение МП в любой из зон (Р, БВ, КП):

- Если не нужно вращать ТШ, то прямо перемещать МП (мост и тележку) до заданной координаты;
- Если нужно и допускается вращение ТШ, то параллельно вращается ТШ и перемещается МП (мост и тележка) до заданной координаты;
- Если нужно вращать, но не допускается вращать ТШ, то сначала перемещать МП (мост и тележку) до ближайшей точки, позволяющей вращать ТШ на нужный фиксированный угол, потом параллельно вращать ТШ и перемещать МП до заданной координаты.

2. Движение МП через транспортный коридор:

- Если не нужно вращать ТШ, то есть ТШ находится на 0° или 180° , то прямо перемещать МП (мост и тележку) на ось транспортного коридора (ТК);
- Если нужно, но не разрешается вращать ТШ, то прежде переместить МП (мост и тележку) в самую ближайшую точку, позволяющую вращать ТШ на нужный фиксированный угол 0° или 180° , потом параллельно ТШ и перемещать МП (мост и тележку) на ось ТК.

3. Перемещение МП на конечные координаты (после вывода МП в заданную зону):

- Если конечные координаты ТШ равны 0° или 180° , то непосредственно двигать МП (мост и тележку) на координаты цели;
- Если конечные координаты ТШ не равны 0° или 180° и разрешается вращать ТШ, то параллельно вращать ТШ и двигать МП (мост и тележку) на заданные координаты;
- Если конечные координаты ТШ не равны 0° или 180° и не разрешается вращать ТШ, то переместить МП (мост и тележку) в самую ближайшую точку, позволяющую вращать ТШ на нужный фиксированный угол, потом параллельно вращать ТШ и перемещать МП (мост и тележку) на координаты цели.

Перемещение МП внутри зоны и между зонами осуществляется при нахождении РШ и ТШ в транспортных положениях, обеспечивающих безопасные перемещения внутри данной зоны.

При перемещении МП между зонами поворот ТШ, в общем случае, осуществляется в следующей последовательности:

- поворот ТШ от угла наблюдения до угла перемещения во время горизонтальных перемещений моста и (или) тележки или при вертикальных перемещениях ТШ и (или) РШ;
- перемещение МП между зонами (по транспортным коридорам) при неизменном угле перемещения;
- поворот ТШ от угла перемещения до заданного угла наблюдения во время горизонтальных перемещений моста и (или) тележки или при вертикальных перемещениях ТШ и (или) РШ.

Угол перемещения ТШ при перемещениях МП между зонами составляет 0 или 180 градусов.

Основным углом перемещения ТШ принят угол 180 градусов. Выбор угла перемещения осуществляется системой управления в зависимости от координат ячейки извлечения/установки ТВС.

При перемещении МП внутри зоны поворот ТШ, в общем случае, осуществляется в следующей последовательности:

- поворот ТШ во время перемещения МП (мост и тележка) от исходной координаты к конечной координате. Поворот ТШ осуществляется от угла наблюдения на исходной координате в направлении ближайшего угла наблюдения, разрешенного для конечной координаты;
- промежуточный останов МП, если время перемещения МП от исходной координаты до конечной координаты, меньше времени необходимого для по-

ворота ТШ от угла наблюдения на исходной координате до угла наблюдения на конечной координате;

в) перемещение МП от координаты останова до конечной координаты без поворота ТШ.

Приведем пример алгоритма извлечения ТВС из ячейки стеллажа БВ и ее установки в ячейку реактора.

Выберем для этого операцию с маршрутом от ячейки 1_1_1 до ячейки Р_1_11.

Маршрут с точкой старта и точкой финиша показан на рисунке 7.

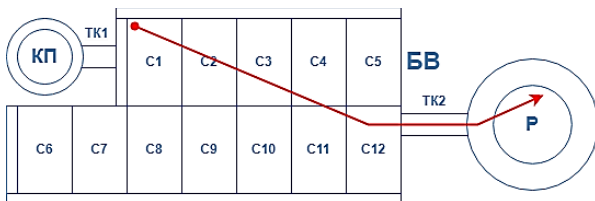


Рисунок 7. Маршрут от стеллажа C1 к реактору [составлено авторами]

Figure 7. Route from rack C1 to the reactor [compiled by the authors]

Далее обозначим красным цветом ячейку извлечения и ячейку установки, как показано на рисунках 8 и 9. Зеленым прямоугольником же обозначена телевизионная штанга с ее углом обзора.

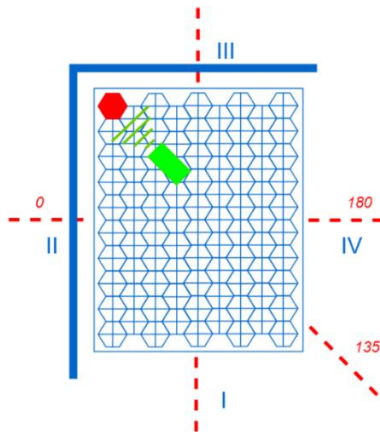


Рисунок 8. Ячейка извлечения ТВС [составлено авторами]

Figure 8. Fuel assembly extraction cell [compiled by the authors]

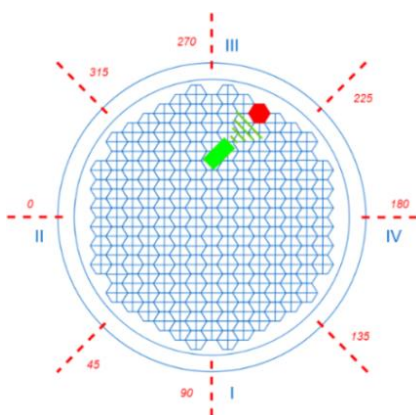


Рисунок 9. Ячейка установки ТВС [составлено авторами]

Figure 9. Fuel Assembly Cell [compiled by the authors]

Обратим внимание, что обе ячейки расположены в верхних углах, где находящиеся рядом стенки не позволяют расположить ТШ только на одном из четырех (45, 135, 225, 315) подходящих углах обзора. В стеллаже это угол 135 градусов, в реакторе – 45 градусов.

Предположим, что МП уже находится над начальной ячейкой с РШ в транспортном положении и ее ТШ повернута на угол 135 градусов. Тогда необходимый алгоритм для ТШ будет следующим:

1) получить начальную и конечную координаты установки ТВС;

2) вместе с захватом РШ опуститься к ТВС для наблюдения за процессом извлечения;

3) подняться вместе с захватом РШ в транспортное положение;

4) зная координату установки ячейки с единственно допустимым углом наблюдения в 45 градусов, и зная необходимость прохождения коридора между зонами, при перемещении МП ТШ должна успеть развернуться на угол 0 градусов, так как, если ТШ развернется на 180 градусов, ей понадобится больше времени для разворота на угол наблюдения;

5) развернуться так, чтобы не мешать движению МП;

6) развернуться на угол 0 градусов перед прохождением через ТК2;

7) зная координату ячейки, после прохождения ТК2 развернуться на единственный допустимый угол наблюдения 45 градусов;

8) дождаться прибытия МП на координату установки ТВС;

9) вместе с захватом РШ опуститься к ТВС для наблюдения за процессом установки;

10) подняться вместе с захватом РШ в транспортное положение.

Определим время, затраченное на эту операцию.

Время, за которое МП переместится от ячейки в стеллаже C1 к центру C12, равняется 23,916 с. Учитывая, что, чтобы ТШ успела развернуться от 135 до 0° нужно 11,25 сек, можем смело утверждать, что ТШ успеет развернуться на необходимый угол для прохождения ТК2.

Путь от C12 до первой ячейки реактора, учитывая, что здесь будет использоваться лишь скорость моста, займет 14,43 с.

Стоит помнить, что, хотя ограничений на скорость перемещения МП внутри реактора формально нет, при перемещении обычно замедляются из-за проблем с ускорением и замедлением внутри ограниченного пространства. Это связано как с вопросом безопасности, так и с тем фактом, что при операциях внутри реактора МП попросту не успеет развить максимальную скорость.

Получим время достижения ячейки Р_1_11, равное 19,22 с. Чтобы развернуть ТШ от 0 до 45° нужно 3,75 секунд, так что времени для этого достаточно.

Подводя итоги, установим, что для выполнения операции 1_1_1 – Р_1_11 общие затраты времени составляют 57,566 секунд.

Теперь предположим, что после этой операции идут еще две: Р_4_14 – 5_7_7 и 12_10_7 – 2_2_3. По началу процесс практически не отличается от преды-

дущего – также осуществляется перемещение от ячейки P_1_11 до P_4_14, а затем проход через коридор. Здесь поворот нужен только для прохождения коридора, так как у ячейки допустимые углы 315 и 45°, тот есть тот, на который ТШ уже повернута с конца предыдущей операции.

Однако после прохождения коридора к центру С12 МП должна переместиться к ячейке 5_7_7, допустимые углы которой также 45 и 315°. С точки зрения алгоритма, учитывающего только текущую операцию, очевидным и наиболее выгодным вариантом будет развернуться перед коридором до 0°, после чего до 45°. Время пути от коридора до ячейки составляет 6,75 с, и время разворота 3,75, что вписывается в лимит. Проблема заключается в том, что в следующей операции МП должна переместиться на ячейку 12_10_7 с единственным допустимым углом 315°. ТШ придется совершить долгий поворот за 22,5 с, что не вписывается в путь до ячейки 16,88 с (ячейка расположена строго на юг от предыдущей, поэтому для пути напрямик учитывается только скорость тележки). К тому же МП расположена в месте, где не допускается подобный разворот, т.е. перед долгим поворотом также потребуется переместиться на безопасное расстояние от стены (минимум 2,09 с). Поэтому после отъезда в допустимый для разворота участок перед МП встает выбор из трех вариантов: ждать поворота ТШ перед дальнейшим перемещением; замедлить движение, чтобы успеть произвести поворот перед прибытием к ячейке; делать разворот во время «лишнего» движения вроде перемещения по дуге или зигзагом, чтобы не потерять скорость.

В случае применения улучшенного алгоритма, учитывающего последующие операции, процесс будет выглядеть следующим образом: МП покидает коридор с ТШ на угле 180°, и для поворота до 315° ей потребуется 11,25 с, что также потребует выбора из трех вариантов, однако с середины С12 поворот можно начинать сразу же, так как есть свободное место, и к моменту прибытия к «проблемным» ячейкам ТШ продолжит разворот уже на допустимом диапазоне 270–315°. Однако, переходя к следующей операции, новый алгоритм получает дополнительное преимущество, поскольку ТШ уже находится на необходимом угле наблюдения и требуется лишь движение МП, чтобы проводить операцию с ячейкой 12_10_7 (рис. 10).

Если предположить, что оба алгоритма в этой ситуации сочли оптимальным замедлить движение МП, чтобы дать ТШ время для необходимого поворота, то это уже дает возможность сэкономить 3,21 с (10,24% от 31,34 сек. существующего алгоритма) исключительно за счет оптимизации поворота, без учета изменения траектории движения и дальнейшего процесса оптимизации алгоритма. Учитывая, что набор операций выгрузки и перегрузки с МП может составлять до сотен операций, оптимизированный алгоритм может помочь ощутимо сократить время выполнения транспортно-технологических циклов.



Рисунок 10. Пример работы улучшенного алгоритма [составлено авторами]

Figure 10. Example of operation of the improved algorithm [compiled by the authors]

Заключение

В ходе работы были изучены конструкция и назначение рабочей зоны, машины перегрузочной и ее элементов, а также последовательность выполнения технологических операций. Это позволило уточнить и дополнить характеристики всех необходимых элементов рабочей зоны, что дало возможность сформулировать ограничения задачи. Были выявлены точное расположение всех участвующих ячеек и допустимые для них углы перемещения и наблюдения; проведен расчет времени для операции с машиной перегрузочной с использованием улучшенного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Борознов В.О. Исследование решения задачи коммивояжера. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2009;2:147–151. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/links/a125451d7d891420f1647095bf4f1fd0/vagtu262.pdf> (дата обращения: 08.01.2024).
Boroznov V.O. Research of the task solution of the traveling salesman. *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer sciences and informatics*. 2009;2:147–151. (In Russ.) Available at: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=vagtu&paperid=262&option_lang=eng (accessed: 08.01.2024).
2. Коробкин В.В., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Ченцов А.Г. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций. Монография; под общ. ред. И.А. Каляева. Москва: Новые технологии, 2012. 233 с. ISBN 978-5-94694-027-6. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23322009> (дата обращения: 21.11.2023).

Korobkin V.V., Seseikin A.N., Tashlykov O.L., Chentsov A.G. Methods of routing and their appendix in problems of increase of efficiency and safety of operation of nuclear power plants. Monograph; ed. by I.A. Kalyaev. Moscow: New technologies, 2012. 233 p. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23322009> (accessed: 21.11.2023).

3. Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Кузлин М.Ю., Ченцов А.Г., Кадников А.А. Использование метода динамического программирования для оптимизации траектории перемещения работников в радиационно опасных зонах с целью минимизации облучения. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2006;2:41–48. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2006/02.pdf> (дата обращения: 08.01.2024).

Seseikin A.N., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Kuklin M.Yu., Chentsov A.G., Kadnikov A.A. Ispol'zovanie metoda dinamicheskogo programmirovaniya dlya optimizatsii traektorii peremeshcheniya rabotnikov v radiatsionno opasnykh zonakh s tsel'yu minimizatsii oblucheniya. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2006;2:41–48. (In Russ.) Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2006/02.pdf> (accessed: 08.01.2024).

4. Балушкин Ф.А., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Чеблоков И.Б., Щеклеин С.Е., Ченцов А.Г. Использование метода динамического программирования для оптимизации демонтажа оборудования энергоблоков АЭС, выводимых из эксплуатации, с целью минимизации облучения. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2009;4:169–176. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2009/04.pdf> (дата обращения: 23.11.2023)

Balushkin F.A., Seseikin A.N., Tashlykov O.L., Cheblokov I.B., Shcheklein S.E., Chentsov A.G. Ispol'zovaniye metoda dinamicheskogo programmirovaniya dlya optimizatsii demontazha oborudovaniya energoblokov AES vyvodimykh iz ekspluatatsii s tsel'yu minimizatsii oblucheniya [Using a dynamic programming method to optimize disassembly of the decommissioned NPP equipment for exposure minimization]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. (In Russ.) Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2009/04.pdf> (accessed: 23.11.2023).

5. А.Г. Ченцов, А.А. Ченцов. Об одной задаче маршрутизации, ориентированной на проблему демонтажа радиационно опасных объектов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование*. 2022;15(3):83–95. <https://doi.org/10.14529/mmp220306>

6. Ченцов А.Г., Ченцов А.А., Григорьев А.М. Об одной задаче маршрутизации, моделирующей перемещения в радиационных полях. *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2017;27(4):540–557. <https://doi.org/10.20537/vm170405>

7. Ченцов А.Г., Ченцов А.А., Сесекин А.Н. Одна задача маршрутизации работ в условиях повышенной радиации. *Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета*. 2021;58:94–126. <https://doi.org/10.35634/2226-3594-2021-58-06>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Рябов А.О. – анализ предметной области, разработка модифицированного алгоритма, проведение расчетов;

Цуверкалова О.Ф. – постановка задачи, руководство научно-исследовательской работой и проверка результатов, редактирование текста статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Ryabov A.O. – subject area analysis, modified algorithm development, carrying out calculations;

Tsuverkalova O.F. – problem formulation, management of research work and verification of results, article editing and preparation for publication.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Внешнее финансирование отсутствует.

FUNDING:

No external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Антон Олегович Рябов, магистрант по направлению 27.04.03 Системный анализ и управление, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация. e-mail: ryantony60@gmail.com

Ольга Феликсовна Цуверкалова, кандидат экономических наук, доцент, доцент 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/0000-0001-6304-4498> e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Anton O. Ryabov, Master's student, 27.04.03 System Analysis and Management speciality, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: ryantony60@gmail.com

Olga F. Tsuverkalova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Information and Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6304-4498>

e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

Поступила в редакцию 08.01.2024

После доработки 25.02.2024

Принята к публикации 29.02.2024

Received 08.01.2024

Revision 25.02.2024

Accepted 29.02.2024

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY**

УДК: 621.311.25: 004.42

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-12>

EDN WNWUKJ

Оригинальная статья / Original paper




Определение минимального времени выдержки профилированных кассет на Армянской АЭС с учетом графика нагрузки

М.Т. Акобян^{1,2}  , А.И. Ксенофонтов² , С.А. Саргсян¹ , Ш.Б. Умаров³

¹ Армянская атомная электростанция, г. Мецамор, Республика Армения

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

³ Ташкентский филиал Национального исследовательского ядерного университета, г. Ташкент, Республика Узбекистан

 marine_h@mail.ru





Аннотация. Определение минимально необходимого времени выдержки профилированных кассет на Армянской АЭС с учетом графика нагрузки, является необходимым условием безопасной эксплуатации профилированных кассет, используемых в активном энергетическом процессе, протекающем на атомной станции. При осуществлении вышеуказанного процесса, учет и контроль факторов, связанных с изменениями в электроэнергетической нагрузке на станцию в различные периоды времени, является обязательным условием безопасной эксплуатации. В рамках данного научного исследования проводится анализ технических характеристик профилированных кассет, а также рассматривается влияние их технических характеристик на производительность АЭС. Важными аспектами, на которые оказывает влияние время выдержки, являются: безопасность эксплуатации, соответствие нормативным требованиям, расчет отвода тепла в соответствии с графиком нагрузки. Эта работа нацелена на обеспечение оптимальной и безопасной эксплуатации отработавших тепловыделяющих сборок, адаптированной к условиям выдержки и отраженную в графике нагрузки, что в свою очередь способствует более эффективному функционированию атомной станции. Данное исследование направлено на обоснование минимально необходимого времени выдержки профилированных ядерных кассет, характеризующихся средним обогащением урана на уровне 3,82% и средним выгоранием по высоте, составляющим 45,7 мегаватт-суток на килограмм урана (МВт сут./кгU). Расчеты проводились с использованием программы ORIGEN-ARP, входящей в пакет программ SCALE, предназначенный для анализа и моделирования протекания ядерных процессов. Для обоснования минимального времени выдержки кассет были, в первую очередь, учтены следующие параметры: состав ядерных кассет и выгорание топлива. Также было произведено моделирование описываемого процесса на основании полученных расчетных данных и анализ безопасности и эффективности исследуемого процесса. Цель настоящего научного исследования заключается в анализе результата, достигнутого при определенном времени выдержки ядерных кассет, с учетом установленных параметров. Для достижения заявленной цели используются современные методы вычислений, предоставляемые программой ORIGEN-ARP, входящей в состав программного комплекса SCALE. Полученные в ходе исследования результаты способны внести значительный вклад в процесс улучшения эффективности и безопасности эксплуатации ядерных энергетических установок.

Ключевые слова: АЭС, атомная энергетика, радиационная безопасность, расчет остаточного энерговыделения, программа ORIGEN.

Для цитирования: Акобян М.Т., Ксенофонтов А.И., Саргсян С.А., Умаров Ш.Б. Определение минимального времени выдержки профилированных кассет на Армянской АЭС с учетом графика нагрузки. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):93–100. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-12>

For citation: Hakobyan M.T., Ksenofontov A.I., Sargsyan S.A., Umarov Sh.B. Determining the minimum required cooling time for profiled assemblies at the Armenian Nuclear Power Plant taking into account the load schedule. *Global nuclear safety*. 2024;14(1): 93–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-12>


Determining the minimum required cooling time of profiled assemblies at the Armenian Nuclear Power Plant taking into account the load schedule

Marine T. Hakobyan^{1,2}  , Alexander I. Ksenofontov² , Sos A. Sargsyan¹ ,
Shohmirzo B. Umarov³

¹ HAEK CJSC, Metsamor, Republic of Armenia

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

³ Branch of National Research Nuclear University MEPhI in Tashkent, Tashkent, Republic of Uzbekistan

 marine_h@mail.ru

Abstract. Determining the minimum required cooling time of profiled assemblies at the Armenian Nuclear Power Plant, taking into account the load schedule, is an analytical process to establish the shortest required period during which profiled assemblies used in the nuclear power plant energy process must remain in active use. This process considers factors related to changes in the electrical load on the station during different periods. Within the scope of this definition, an analysis of the technical characteristics of profiled assemblies is conducted as well as their impact on the overall performance of the nuclear power plant. Key considerations in the cooling time include operational safety, compliance with regulatory requirements, and efficient distribution of energy resources in accordance with the load schedule. The goal of this process is to ensure optimal and safe operation of profiled assemblies, adapted to changes in the electrical grid and aligned with the load schedule, thereby contributing to the more efficient functioning of the nuclear power plant. This study aims to substantiate the minimum required cooling time for profiled nuclear assemblies characterized by an average uranium enrichment of 3.82% and an average burnup of 45.7 Megawatt-days per kilogram of uranium (MWD/kgU). Calculations are performed using the ORIGEN-ARP program, part of the SCALE software package designed for the analysis and modeling of radioactive and nuclear processes. The study considers parameters such as the composition of nuclear assemblies, fuel burnup, modeling using the ORIGEN-ARP program, and safety analysis. The results obtained aim to make a significant contribution to enhancing the efficiency and safety of nuclear energy installations.

Keywords: Nuclear power plant, nuclear energy, radiation safety, residual heat release calculation, ORIGEN program.

Введение

Проекты реакторных установок первого поколения (знаменитые ВВЭР-440) – а именно, В-179, В-230 и В-270 – первоначально разрабатывались в условиях отсутствия четко определенных положений и нормативов, которые бы регламентировали правила безопасности атомных станций и включали бы в себя нормы и стандарты, утвержденные на государственном уровне для Армянской АЭС [1]. Главным приоритетом в обеспечении безопасности рассматриваемых проектов было недопущение серьезных нарушений герметичности первого контура, которые могли бы привести к значительному сбою в процессе охлаждения активной зоны реактора.

Для обеспечения безопасности реактора, проектирования внутреннего транспортно-технологического тракта, включающего в себя размещение перегрузочного оборудования для транспортировки отработавших тепловыделяющих сборок, а также для безопасного обращения с радиоактивными отходами, необходимо проводить расчетное прогнозирование остаточного энерговыделения тепловыделяющих сборок (далее – ТВС). Прежде чем непосредственно перейти к рассмотрению актуальности прогнозирования энерговыделения, рассмотрим несколько подробнее уже упомянутые выше понятия: «тепловыделяющие сборки» и «остаточное энерговыделение».

Итак, ТВС представляют собой один из ключевых компонентов ядерного реактора, состоят из некоторого количества тепловыделяющих элементов и отвечают за генерацию тепла, образующегося в результате ядерного деления. Эскиз кассеты предоставлен на рисунке 1. Остальные параметры ТВС [2] приведены в таблице 1.

В качестве графика нагрузки в данной статье предполагается рассмотреть фактическую историю облучения ТВС со средним обогащением 3,82% на Армянской АЭС реактора ВВЭР-440 в период с 2018 по 2022 годы. В таблице 2 приведены данные, отражающие длительность облучения кассеты в реакторе при полной мощности его работы.

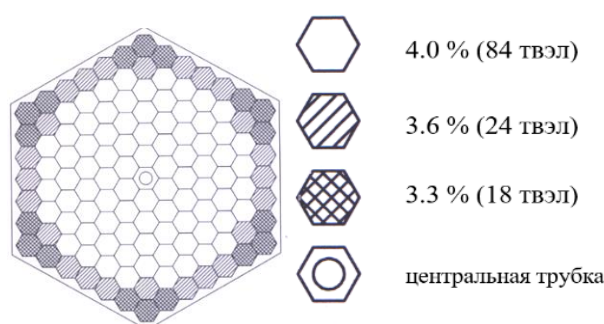


Рисунок 1. Эскиз кассеты¹
Figure 1. Assembly drawing¹

Таблица 1. Характеристики ТВС¹
Table 1. Fuel Assembly Characteristics¹

№п/п	Тип характеристики	Значение
1	Среднее обогащение топлива, %	3,82
2	Вес урана в кассете, кг	120,2±2,5
3	Шаг между ТВЭлами, см	1,23
4	Размер под ключ, мм	145
5	Диаметр ТВЭла, мм	9,1/7,73
6	Эффективная высота топливного столба в холодном состоянии, мм	2420±10
7	Диаметр топливной таблетки, мм	7,57/1,4
8	Плотность таблеток, г/см ³	10,4±10,7

Таблица 2. График нагрузки²
Table 2. Load schedule²

№ загрузки	№ кассеты	Длительность загрузки, эфф. сут.	Длительность загрузки, сут.	Длительность ППР, сут.
25	24	253	321	42

¹ Основные физико-технические характеристики ВВЭР-440. – Режим доступа: <https://inis.iaea.org> (дата обращения: 03.01.2024)

² ARMENIAN-2. Operational <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=2> (дата обращения: 03.01.2024)

Остаточное энерговыделение, возникающее вследствие радиоактивного распада облученных топливных элементов после их извлечения из реактора, представляет собой один из важнейших факторов стабильной работы реактора, поскольку избыток тепла способен привести к перегреву и повреждению тепловыделяющих сборок, если не будет контролироваться и отводиться должным образом.

Отсюда следует, что необходимость прогнозирования уровня остаточного энерговыделения играет решающую роль в процессе принятия решений при обращении с отработанным ядерным топливом, а также должно учитываться в процессе разработки и модернизации технологий, касающихся безопасного хранения и транспортировки ядерных материалов. Согласно расчетам исследователей, существует необходимость обеспечить точность прогнозирования остаточного энерговыделения облученных топливных сборок с погрешностью не более 10% в течение периода охлаждения от нескольких секунд до нескольких месяцев [3]. Точность прогнозирования остаточного энерговыделения облученных топливных сборок является критически важным фактором, напрямую влияющим как на обеспечение надежности и эффективности функционирования ядерных энергетических систем, так и на обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными материалами.

Главная цель вышеупомянутых исследований заключается в выявлении и обосновании оптимальных начальных условий, которые способствовали бы фиксации реалистичных показателей, полученных в ходе проведения анализа теплогидравлических процессов, с учетом граничных показателей, для обеспечения безопасного процесса эксплуатации реактора. Также, согласно исследуемым источникам, известно, что дополнительно велись серии исследований, касающиеся обоснования нейтронно-физических характеристик ядерного реактора, основывающиеся на расчетно-аналитических данных и направленные на повышение уровня безопасной эксплуатации ядерных установок.

В рамках настоящей исследовательской работы были рассмотрены ключевые параметры остаточного энерговыделения в тепловыделяющих сборках с последующим анализом методов, применяющихся для расчета и прогнозирования уровня остаточного энерговыделения, с целью уменьшения погрешностей получаемых экспериментальных данных, необходимых для разработки и реализации мер по безопасному обращению с тепловыделяющими сборками и обеспечения стабильной работы ядерных реакторов. Настоящее исследование включает в себя попытку отразить зависимость остаточного энерговыделения от времени выдержки, при помощи программного обеспечения ORIGEN-ARP из расчетного комплекса SCALE, предназначенного для решения подобных задач [4]. Полученные результаты могут найти свое практическое применение при конструировании более безопасных в эксплуатации ядерных установок нового типа с повышенной эффективностью работы.

Методика расчета остаточного энерговыделения

Одним из ключевых аспектов, требующих пристального внимания физиков-ядерщиков, является проведение расчетов остаточного энерговыделения, поскольку определение параметров остаточного энерговыделения является необходимым при оценивании минимального времени выдержки топлива для безопасного перехода на сухое хранение [5].

Для определения остаточного энерговыделения существует несколько расчетных методик, выбор которых зависит от различных факторов. В том случае, когда известен изотопный состав отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), энерговыделение может быть рассчитано с использованием следующей формулы (1)³:

$$Q_{\text{all}}(t) = \sum_{i=1}^I \lambda_i \rho_i(t) E_i^{\text{all}}, \quad (1)$$

где E_i^{all} – полная энергия, выделяющаяся в распаде i -го изотопа без учета энергии нейтрино, Дж.;

λ_i – постоянная распада i -го изотопа;

ρ_i – концентрация i -го изотопа;

E_i^{all} – значения представлены в файлах оцененных ядерных данных⁴.

Для оценки мощности энерговыделения нередко прибегают к использованию упрощенных формул, которые позволяют проводить ускоренные расчеты, не пренебрегая особенностями изотопного состава ядерного топлива, а также иными параметрами, оказывающими влияние на энерговыделение. В качестве примера подобных формул можно привести формулы Вигнера (2) и Вея (3), которые получили широкое распространение при проведении вышеописанных расчетов⁵:

$$\frac{Q_{\beta,\gamma}}{Q_0} = 6,5 \cdot 10^{-2} [\tau_c - 0,2 - (T_c + T)^{-0,2}], \quad (2)$$

$$\frac{Q_{\beta,\gamma}}{Q_0} = 6,5 \cdot 10^{-3} [\tau_c - 0,2 - (T_c + T)^{-0,2}], \quad (3)$$

³ Давиденко Н.Н., Куценко К.В., Тихомиров Г.В., Лаврухин А.А. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами в атомной энергетике. – Москва: Московский инженерно-физический институт, 2007. – 136 с. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004101808> (дата обращения: 04.01.2024)

⁴ Колесов В.В., Терновых М.Ю., Тихомиров Г.В. Файлы ядерных данных и их использование в нейтронно-физических расчетах. – Москва: МИФИ, 2014. – 68 с. – Режим доступа: <https://z-library.se/book/3061691/3b9770> (дата обращения: 04.01.2024)

⁵ Савандер В.И., Увакин М.А. Физическая теория ядерных реакторов. Часть 1. Однородная размножающая среда и теория гетерогенных структур. – Москва.: МИФИ, 2007. – 200 с. – Режим доступа: [https://dl.booksee.org/genesis/791000/e087b83ad212dea51d83d87a3d448d47/as/\[V.I.Savander,M.A.Uvakin\].FIZICHESKAYA.TEORIYA.\(BookSee.org\).pdf](https://dl.booksee.org/genesis/791000/e087b83ad212dea51d83d87a3d448d47/as/[V.I.Savander,M.A.Uvakin].FIZICHESKAYA.TEORIYA.(BookSee.org).pdf) (дата обращения: 04.01.2024)

где $Q_{\beta,\gamma}$ – остаточное энерговыделение через время τ_c после остановки;

Q_0 – мощность реактора до остановки, на которой он работал в течение времени T .

В формуле (2) время работы и время простоя реактора выражено в секундах, в формуле (3) – в сутках, а $Q_{\beta,\gamma}$ и Q_0 – в одинаковых единицах мощности. Формулы (2) и (3) – приближенные. При времени выдержки, превышающем 10 суток, с помощью указанных выше формул, получают завышенные оценки энерговыделения.

Методология

Для проведения расчетной части настоящего исследования применялся точечный код расчета выгорания и распада ORIGEN, разработанный в Ок-Риджской национальной лаборатории (англ. – Oak Ridge National Laboratory, США, штат Теннесси).

Данный тип кода нашел широкое применение в ядерной инженерии, в основном благодаря возможности анализа и прогнозирования трансмутационных процессов, протекающих в ядерных материалах при различных условиях и времени эксплуатации. Код ORIGEN часто применяется для оценки остаточного энерговыделения, состава ядерных отходов и других параметров, важных для безопасности и эффективности работы ядерных установок – в частности для расчета изменения состава и уровня радиоактивности топливных элементов, продуктов деления, конструктивных особенностей материалов в ядерных реакторах. ORIGEN-ARP представляет собою расширенную версию ORIGEN⁶, новую аналитическую последовательность SCALE для определения характеристик отработанного топлива, анализа и расчета производных функций активации для различных приложений, таких как расчет радиационных характеристик материалов в ядерных установках. Поскольку необходимые для расчетной части исследовательской работы нейтронно-физические константы отсутствовали в малоугрупповой системе констант FastCons, было принято решение осуществить расчет констант при помощи пакета программ TRITON-4⁷. Выбор конкретного программного обеспечения для проведения расчетной части исследования обусловлен спецификой TRITON-4, поскольку используемое программное обеспечение предназначено для расчетов нейтронно-физических характеристик рабочих кассет ядерного реактора, подвергшихся профилированию обогащения.

Также необходимо отметить, что основное преимущество программы ORIGEN перед другими программами состоит в возможности представления полной матрицы изотопных переходов без количествен-

ных ограничений на число переходных цепочек. Это стало возможным благодаря рациональному применению матричного экспоненциального метода с рекурсивным отношением, который требует хранения только двух добавочных векторов к вектору решения. ORIGEN используется для проведения детального расчета нуклидного состава ТВС после облучения.

Визуальное отображение создания библиотеки реакторов ORIGEN с помощью пакета SCALE представлено на рисунке 2.

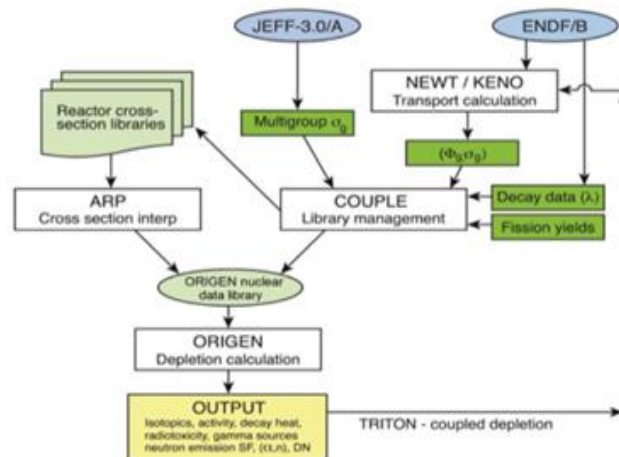


Рисунок 2. Создание библиотек реакторов ORIGEN с помощью SCALE

Figure 2. Generating ORIGEN reactor libraries WITH SCALE

Аксиальное распределение выгорания

При осуществлении расчета остаточного энерговыделения была использована программа ORIGEN-ARP пакета программ SCALE 6.1. Как уже было упомянуто выше, для получения расчетных данных нейтронно-физических констант, чье значение находится в прямой зависимости от глубины выгорания для профилированных кассет со средним обогащением 3,82%, были рассчитаны с использованием программного пакета TRITON-4, ввиду отсутствия библиотеки требуемых констант. В ходе осуществления расчетов, в качестве временного интервала был принят условный срок равномерного выгорания кассеты, составляющий четыре года, который не превышает фактический срок облучения кассет. Повысотное распределение выгорания представлено в таблице 3.

Таблица 3. Повысотное распределение выгорания [составлено авторами]

Table 3. Altitude distribution of burnup [compiled by the authors]

Номер узла	Распределение выгорания по высоте для кассеты со средним выгоранием 45.7 Мвт сут./кгU	Распределение выгорания по высоте с учетом коэффициента запаса
1.	19.49	20.37
2.	23.51	24.57
3.	28.70	29.99
4.	32.96	34.44
5.	36.38	38.02
6.	39.21	40.97

⁶ SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations. ORNL/TM-2005/39. Version 5. Vols. I-III. April 2005.

⁷ U.S. N.R.C SCALE/TRITON Primer: A Primer for Light Water Reactor Lattice Physics Calculations NUREG/CR-7041. P. 278.

Номер узла	Распределение выгорания по высоте для кассеты со средним выгоранием 45.7 Мвт сут./кгU	Распределение выгорания по высоте с учетом коэффициента запаса
7.	41.49	43.35
8.	43.35	45.30
9.	44.87	46.89
10.	46.16	48.23
11.	47.30	49.43
12.	48.33	50.51
13.	49.23	51.45
14.	49.93	52.18
15.	50.55	52.83
16.	51.09	53.39
17.	51.52	53.84
18.	51.85	54.18
19.	52.09	54.44
20.	52.29	54.65
21.	52.45	54.81
22.	52.58	54.94
23.	52.68	55.05
24.	52.76	55.14
25.	52.82	55.20
26.	52.86	55.24
27.	52.88	55.26
28.	52.86	55.23
29.	52.79	55.16
30.	52.65	55.02
31.	52.41	54.77
32.	52.04	54.38
33.	51.48	53.79
34.	50.65	52.93
35.	49.45	51.67
36.	47.74	49.89
37.	45.34	47.38
38.	41.99	43.88
39.	37.38	39.06
40.	31.08	32.47
41.	24.25	25.34
среднее	45.64	47.70

Распределение выгорания по высоте с учетом коэффициента запаса подразумевает выгорание с учетом верхнего предела погрешности. Верхний предел погрешности составляет 1,045 от расчетной величины [6].

При выполнении работы с помощью программы ORIGEN-ARP пакета программ SCALE 6.2, были проведены расчеты:

- 1) с графиком нагрузки, что был использован при обосновании минимального времени выдержки ОЯТ для безопасного перехода на сухое хранение⁸;
- 2) с реальным графиком нагрузки;
- 3) с предположением, что данная глубина выгорания достигается за 4 года.

Расчет остаточного энерговыделения с графиком нагрузки, использованном при обосновании

При выполнении проверочного расчета остаточного энерговыделения, за основу был принят реальный

график нагрузки. Расчет был выполнен при помощи программы ORIGEN-ARP, включающего в себя пакет программ SCALE 6.2, в котором присутствует библиотека нейтронно-физических констант, напрямую коррелирующих с глубиной выгорания для профилированных кассет со средним обогащением 3,82%. Расчет был выполнен с целью оценки влияния допущений, принятых при обосновании безопасности остаточного энерговыделения. График двух расчетов представлен на рисунке 3.

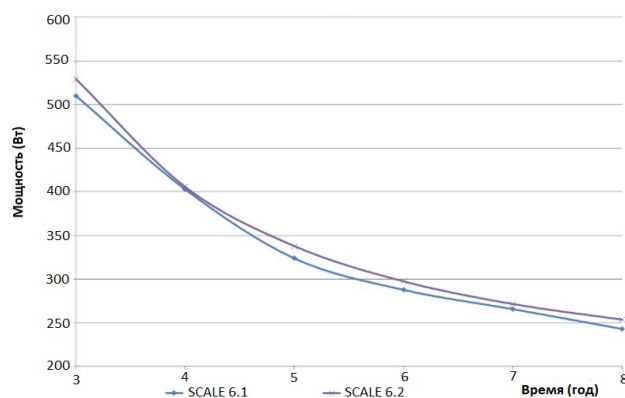


Рисунок 3. Расчет остаточного энерговыделения с графиками нагрузки, принятой в обосновании программными пакетами SCALE 6.1 и SCALE 6.2 [составлено авторами]

Figure 3. Calculation of residual energy release with a load diagram adopted in the justification using the SCALE 6.1 AND SCALE 6.2 software packages [compiled by the authors]

По истечении временного промежутка в восемь лет, в течение которого велось охлаждение, расчетные параметры остаточного энерговыделения, составляют:

- при расчете с использованием пакета SCALE 6.2 – 253.9 Вт, с учетом верхнего предела погрешности 259.7 Вт;
- при расчете с использованием пакета SCALE 6.1 – 243.3 Вт соответственно, с учетом верхнего предела погрешности 248.9 Вт.

При рассмотрении наиболее устойчивого результата, полученного кодом SCALE 6.2 (с учетом верхнего предела погрешности 259.7 Вт), в запасе остается 5.3 Вт до допустимого значения, которое, в свою очередь, согласно рекомендациям национального регулятора Республики Армения, составляет 265 Вт.

Расчет остаточного энерговыделения с реальным графиком нагрузки

При выполнении проверочного расчета остаточного энерговыделения, за основу был принят реальный график нагрузки. Расчет был выполнен при помощи программы ORIGEN-ARP, включающей в себя пакет программ SCALE 6.2, в котором присутствует библиотека нейтронно-физических констант, напрямую коррелирующих с глубиной выгорания для профилированных кассет со средним обогащением 3,82%. Расчет был выполнен с целью оценки влияния допущений, принятых при обосновании безопасности остаточного энерговыделения. График двух расчетов представлен на рисунке 4.

⁸ NUH-003 Final safety analyzes report. US Nuclear Regulatory Commission, June 2004. Volume 2.

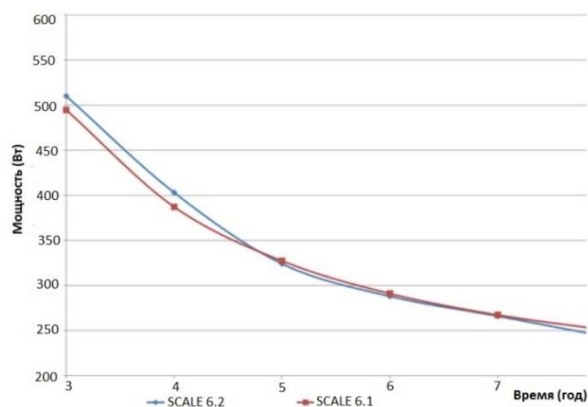


Рисунок 4. Расчет остаточного энерговыделения с реальным графиком нагрузки и предположениями, принятыми в обосновании [составлено авторами]

Figure 4. Calculation of residual energy release with a real load diagram and assumptions adopted in the justification [compiled by the authors]

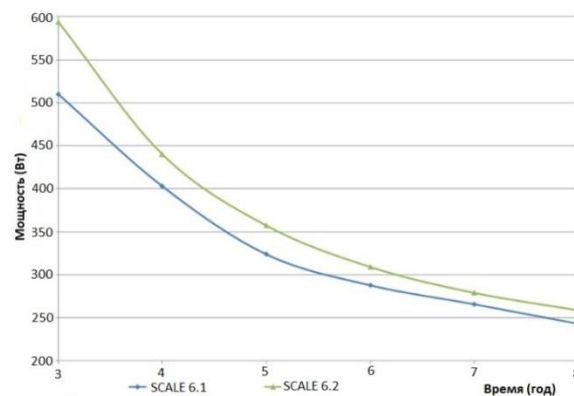


Рисунок 5. Расчет остаточного энерговыделения с допущением достижения данной глубины выгорания за 4 года [составлено авторами]

Figure 5. Calculation of residual energy release assuming that this burnup depth is achieved in 4 years [compiled by the authors]

По истечении временного промежутка в восемь лет, в течение которого велось охлаждение, расчетные параметры остаточного энерговыделения, составляют:

- при расчете с использованием пакета SCALE 6.2 – 255.9 Вт, с учетом верхнего предела погрешности 261.8 Вт;

- при расчете с использованием пакета SCALE 6.1 – 244.3 Вт соответственно, с учетом верхнего предела погрешности 249,9 Вт.

При рассмотрении наиболее устойчивого результата, полученного кодом SCALE 6.2 (с учетом верхнего предела погрешности 261.8 Вт), в запасе остается 3.2 Вт до допустимого значения, которое, согласно рекомендациям национального регулятора Республики Армения, составляет 265 Вт.

Расчет остаточного энерговыделения при допущении достижения требуемой глубины выгорания за 4 года

При выполнении проверочного расчета остаточного энерговыделения примем временной интервал достижения глубины выгорания кассет равным четырем годам. Расчет был выполнен при помощи программы ORIGEN-ARP с применением пакета программ SCALE 6.2, в которой присутствует библиотека нейтронно-физических констант, зависящих от глубины выгорания для профилированных кассет со средним обогащением 3,82%. Расчет выполнен с целью проведения оценивания логичности допущения достижения искомой глубины выгорания за четырехлетний период. Графическое отображение результатов обоих расчетов представлено на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что значения остаточного энерговыделения, при условном временном интервале выгорания равном четырем годам, являются достаточно высокими для всех точек времени охлаждения. Если рассматривать восьмилетний временной промежуток, в течение которого осуществлялся отвод тепла остаточных энерговыделений, при допущении достижения глубины выгорания в четыре года, тогда при расчетах, выполняемых при помощи пакетов

SCALE 6.2 и SCALE 6.1, значения остаточного энерговыделения составляют, соответственно, 258.8 Вт и 245.2 Вт. Несмотря на то, что остаточное энерговыделение при расчете, осуществляемом при использовании пакета SCALE 6.2 выше, чем при расчете, осуществляемом при помощи пакета SCALE 6.1, итоговый результат, даже по верхней границе, все равно остается ниже допустимого значения, которое составляет 265 Вт.

По истечении временного промежутка в восемь лет, в течение которого велось охлаждение, расчетные параметры остаточного энерговыделения, составляют:

- при расчете с использованием пакета SCALE 6.2 – 258.8 Вт, с учетом верхнего предела погрешности 264.7 Вт;

- при расчете с использованием пакета SCALE 6.1 – 245.2 Вт соответственно, с учетом верхнего предела погрешности 256.4 Вт.

При рассмотрении наиболее консервативного результата с использованием пакета SCALE 6.2 – 264.7 Вт, в запасе остается 0.3 Вт до допустимого значения, которое рекомендательно составляет 265 Вт.

Заключение

В статье исследовалась минимальная продолжительность выдержки кассет перед переводом на сухое хранение. Рассматривались три варианта расчета:

- 1) с графиком нагрузки, что был использован при обосновании;
- 2) с реальным графиком нагрузки;
- 3) с предположением, что данная глубина выгорания достигается за 4 года.

Расчеты проводились при помощи программных пакетов SCALE 6.1 и SCALE 6.2. Наиболее консервативные результаты получены с помощью программы SCALE 6.2, которые соответствуют 259.7, 261.8, 264.7 с учетом верхнего предела погрешности соответственно. Все результаты мощности остаточного энерговыделения, полученные для трех разных условий облучения, не превышают допустимый (согласно рекомендациям национального регулятора Республики Армения) предел 265 Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мельников Н. Вопросы безопасности и модернизации АЭС с ВВЭР-440 (В-230). Энергоблоки АЭС первого поколения с реакторными установками ВВЭР-440. ОКБ «Гидропресс». С. 77–86. Режим доступа: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/034/28034591.pdf (дата обращения: 03.01.2024)
Melnikov N. Safety Issues and Modernization of Nuclear Power Plants with WWER-440 (V-230). Power units of first generation nuclear power plants with WWER-440 reactor units. ОКБ Гидропресс. P. 77-86. (In Russ.) Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/034/28034591.pdf (accessed: 03.01.2024)
2. Акобян М.Т., Ксенофонтов А.И. Пути энергообеспечения в Республике Армении. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;43(2):5–14. <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-01>
Hakobyan M.T., Ksenofontov A.I. Ways of Energy Supply in the Republic of Armenia. *Global Nuclear Safety*. 2022;(2):5–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2022-02-01>
3. Карпенко А.И., Розенбаум Е.Л., Забегаев В.П. Исследования остаточного тепловыделения отработавших сборок реактора БН-600 в бассейне выдержки. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2005;1:70–77. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2005/01.pdf> (дата обращения: 05.01.2024).
Karpenko A.I., Rozenbaum E.L., Zabegaev V.P. Research into BN600 reactor irradiated fuel decay heat released in the irradiated fuel cooling pond. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2005;1:70–77. (In Russ.) Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2005/01.pdf> (accessed: 05.01.2024).
4. Hermann O.W., Westfall R.M. ORIGEN-S: SCALE system module to calculate fuel depletion, actinide transmutation, fission product buildup and decay, and association source terms. *NUREG/CR-0200*. 1984. Vol. 2. Available at: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:17040291 (accessed: 05.01.2024).
5. Акобян М.Т., Ксенофонтов А.И., Саргсян С.А. Анализ по сценариям потери теплоотвода из бассейна выдержки на атомных электрических станциях. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):5–16. Режим доступа: <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-01>
Hakobyan M.T., Ksenofontov A.I., Sargsyan S.A. Scenario analysis loss of heat removal from the spent fuel pool on nuclear power plant. *Global nuclear safety*. 2023;48(3):5-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-01>
6. Галстян А.Г., Овсепян А.В., Папоян В.В. Восстановление поля нейтронов с учетом показаний датчиков внутриреакторного контроля. *Ученые записки Ереванского государственного университета. Серия: Физика и Математика*. 1988;2:49–55. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/links/58e5f55d848b5b527cabf2c1a88954eb/uzeru903.pdf> (дата обращения: 04.01.2024).
Galstyan A.G., Hovsepyan A.V., Papoyan V.V. Neutron field reconstruction taking into account the readings of in-reactor monitoring sensors. *Uchenye zapiski Erevanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i Matematika*. 1988;2:49–55. (In Russ.) Available at: <https://www.mathnet.ru/links/58e5f55d848b5b527cabf2c1a88954eb/uzeru903.pdf> (date of reference: 04.01.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Акобян М.Т. – выявление факторов, требующих дополнительных исследований и принятия компенсирующих мер для решения проблем, написание текста статьи;

Ксенофонтов А.И. – концепция и качественная разработка исследования;

Саргсян С.А. – изучение тематического материала, систематизация информации;

Умаров Ш.Б. – обзор источников литературы по теме исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Марине Тадевосовна Акобян, ведущий инженер, Армянская АЭС, г. Мецамор, Республика Армения; аспирант, кафедра радиационной физики и безопасности атомных технологий, «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8710-5734>

e-mail: marine_h@mail.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Hakobyan M.H. – identification of factors requiring additional research and compensatory measures to address the problems, writing the text of the article;

Ksenofontov A.I. – the conceptualization and qualitative design of the study;

Sargsyan S.A. – study of thematic material, systematization of information;

Umarov Sh.B. – a review of literature sources on the research topic.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Marine T. Hakobyan, Lead Engineer, Armenian NPP, Metsamor city, Republic of Armenia; graduate student, Department of Radiation Physics and Nuclear Technology Safety, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8710-5734>

e-mail: marine_h@mail.ru

Александр Иванович Ксенофонов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (доцент) кафедры радиационной физики и безопасности атомных технологий, «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

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

e-mail: aiksenofontov@mephi.ru

Сос Аршакович Саргсян, начальник отдела ядерной безопасности и надежности, Армянская АЭС, г. Мецамор, Республика Армения.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7998-124X>

e-mail: sossargsyan@yahoo.com

Шохмирзо Бахрамович Умаров, ассистент кафедры ядерной физики и теплофизики, Ташкенский филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Ташкент, Республика Узбекистан.

e-mail: shohmirzo631@gmail.com

Aleksandr I. Ksenofontov, Cand. Sci. (Phys. Math.), Senior Research Fellow (Associate Professor), Department of Radiation Physics and Nuclear Technology Safety, National Research Nuclear University «MEPhI», Russian Federation.

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

e-mail: aiksenofontov@mephi.ru

Sos A. Sargsyan, Chief of Nuclear Safety and Reliability Department, Armenian NPP, Metsamor city, Republic of Armenia.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7998-124X>

e-mail: sossargsyan@yahoo.com

Shohmirzo B. Umarov, Department Assistant of Nuclear Physics and Thermophysics, Branch of National Research Nuclear University MEPhI in Tashkent, Tashkent, Republic of Uzbekistan.

e-mail: shohmirzo631@gmail.com

Поступила в редакцию 20.11.2023

После доработки 26.01.2024

Принята к публикации 01.02.2024

Received 20.11.2023

Revision 26.01.2024

Accepted 01.02.2024

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-2024-01-13>


EDN XXPMHI

Оригинальная статья / Original paper



Вопросы разработки системы мотивации сотрудников для
компаний энергетического сектора

В.А. Бондаренко  , Н.В. Пржедецкая 

Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
 b14v@yandex.ru

Аннотация. В качестве объекта исследования в статье выбраны реализующиеся практические решения в части материального и нематериального стимулирования персонала в энергетических компаниях, а также методические установки, обосновывающие их внедрение. Предметной областью выбраны процессы обеспечения мотивации персонала энергетических компаний в России. Цель исследования – на основе анализа представленных в открытой печати сведений о существующих подходах к построению системы мотивации персонала в энергетических компаниях с учетом современных преобразований в отрасли и запроса на инновационное развитие сформулировать направления совершенствования данной работы. В качестве используемых методов при написании статьи выступили теоретический анализ научной литературы по мотивации персонала применительно к задачам развития энергетического сектора, графический метод, анализ статистических данных, анализ документов, освещающих решения в части мотивации персонала в энергетических компаниях и применения передовых цифровых технологий в управлении. Основным результатом исследования выступает вывод о том, что базисом разработки системы мотивации должно выступать восприятие сотрудников, не как одного из ресурсов компании, а как ее ценностного актива, рост вовлеченности которых идет во благо достижению поставленных целей и задач, что предполагает изменение подхода к системе мотивации персонала, а именно, усиление персонализированного компонента. Такой подход позволит концентрироваться на стимулах, материальных и нематериальных, ориентированных на каждого конкретного специалиста, согласно его роли, вкладу и перспективности для организации. Материальные не денежные стимулы могут (при равных размерах в пересчете на денежный эквивалент) отличаться в зависимости от интересов сотрудника, его потребностей (в образовании, занятиях спортом, обследованиях, хобби и т.д.) и потребностей членов его семьи. Нематериальное стимулирование, связанное с формальным и неформальным статусом, личным брендом сотрудника в организации также должно быть индивидуализировано. Это предполагает использование ИИ для обработки массива информации об уже действующих сотрудниках и определения их реального вклада в развитие компании, результативности на текущем месте работы и выработки индивидуализированных мотивационных предложений с последующим замером результативности их трудовой деятельности.


Ключевые слова: управление, система мотивации персонала, персонализация мотивационных решений, дифференциация сотрудников, маркетинг персонала.

Для цитирования: Бондаренко В.А., Пржедецкая Н.В. Вопросы разработки системы мотивации сотрудников для компаний энергетического сектора. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):101–110. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-13>

For citation: Bondarenko V.A., Przhedetskaya N.V. Issues of developing an employee motivation system for energy sector companies. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):101–110 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-13>

Issues of developing an employee motivation system for energy sector companies

Victoria A. Bondarenko  , Natalia V. Przhedetskaya 

Rostov State University of Economics (RINH), Rostov-on-Don, Russian Federation.
 b14v@yandex.ru

Abstract. As the object of research in the paper practical solutions in terms of material and non-material incentives for personnel in energy companies as well as methodological guidelines justifying their implementation are chosen. The subject area chosen is the processes of personnel motivation in energy companies in Russia. The objective of the study is to formulate directions for improving this work based on the analysis of information presented in the open press about existing approaches to building a system of personnel motivation in energy companies, taking into account modern transformations in the industry and the demand for innovative development. The methods used in this article include theoretical analysis of scientific literature on personnel motivation in relation to

the development of the energy sector, graphical method, analysis of statistical data, analysis of documents covering decisions on personnel motivation in energy companies and the application of advanced digital technologies in management. The main result of the study is the conclusion that the basis for the development of the motivation system should be the perception of employees not as one of the company's resources, but as its value asset, the growth of their involvement for the benefit of achieving the goals and objectives which implies a change in the approach to the personnel motivation system, namely, the strengthening of the personalised component. This approach will allow to focus on incentives, tangible and intangible, oriented to each specific specialist, according to his/her role, contribution and prospects for the organisation. Tangible non-monetary incentives may (with equal amounts in terms of monetary equivalent) differ depending on the employee's interests, his/her needs (education, sports, examinations, hobbies, etc.) and the needs of their family. Non-material incentives related to the formal and informal status and personal brand of an employee in the organisation should also be individualised. This implies the use of AI to process an array of information about existing employees and determine their real contribution to the company's development, their performance at their current place of work, and to develop individualised motivational proposals with subsequent measurement of their performance.

Keywords: management, personnel motivation system, personalisation of motivational decisions, employee differentiation, personnel marketing.

Введение

Вопросы мотивации персонала, а также выработки стимулов к его продуктивному труду достаточно давно стали актуальными, в рамках концепции общего управления персоналом – классического менеджмента, где изначально ставилась задача получить максимальный эффект, максимальную отдачу от реализации сотрудниками их трудовых функций. В таком подходе предпринимались усилия по дифференциации предложения сотрудникам, выполняющим рутинизированные операции и тем, в деятельности которых творческий элемент и принятие решений, характерных для их уровня выполнения производственных задач, то есть, использовались партисипативные модели управления, в которых учитывались особенности выполняемой работы и характеристик сотрудников определенного уровня функционала для повышения эффективности осуществляемых усилий [1]. Однако, в этом случае, как правило персонал рассматривался в качестве ресурса, значимого в сравнении с другими, но не превосходящего их по степени влияния на успешность организации.

В настоящее время, ввиду роста значимости нематериальных активов, становления «экономики знаний», роста конкуренции, в целом, успешность работы организации во многом определяют именно ее сотрудники, что подразумевает восприятие их в качестве не просто ресурса, «равного среди многих», а ценностного актива за счет которого осуществляется отстройка от конкурентов, повышается эффективность функционирования организации, в том числе в части роста удовлетворенности ее потребителей. Данное обстоятельство актуализирует исследование системы мотивации персонала, от лояльности которого к организации-работодателю зависит успех [2]. Немаловажное значение в анализе эффективности работы персонала и моделировании индивидуализированных предложений для роста мотивации сотрудников имеют возможности искусственного интеллекта, поскольку они позволяют повысить скорость обработки информации и принятия оправданных управленческих решений.

Отмеченные данности имеют самое существенное значение для предприятий энергетического сектора, поскольку они, во-первых, в высокой степени внедряют решения по цифровой трансформации, предпри-

нимаются усилия по инновационным преобразованиям, а, во-вторых, от качества их работы, вовлеченности сотрудников зависит благополучие в энергоснабжении, энергообеспечении, как предприятий и организаций, так и конечных потребителей.

Мнение специалистов относительно характеристики и наполнения мотивации сотрудников применительно к организациям, работающим в энергетическом секторе

В настоящее время компании, работающие в энергетическом секторе, ориентированы на инновационные преобразования и вовлечены в цифровую трансформацию, о чем свидетельствуют данные об использовании информационно-коммуникационных технологий в организациях производства и распределения электроэнергии в России за 2020–2022 гг. (рис. 1).

Кроме того, организации в энергетическом секторе активно внедряют передовые «цифровые технологии (более 30% бизнес-процессов цифровизованы). Интернет вещей используют более 50% компаний, умного производства – более 40%, используют сенсоры и робототехнику в производстве – порядка 27% энергетических компаний, тогда как, цифровые двойни внедрены у 23%, также как и дополненная реальность»¹.

Указанные обстоятельства определяют интерес исследователей к учету фактора нацеленности на саморазвитие и на инновационные преобразования предприятия применительно к энергетическому сектору. Характеризуя подходы к построению мотивации сотрудников и стимулированию их к продуктивному труду, отметим, что, например, Э. Шакирьянова акцентирует внимание, одновременно, на необходимости концентрации усилий на выработке системы стимулов для сотрудников, основывающейся на финансовой, маркетинговой и инновационной составляющих, а также на энергоэффективных решениях, позволяющих повысить рациональность в использовании вовлекаемых ресурсов [4]. А. Звездилин предполагает, что мотивация персонала (и это справедливо для ком-

¹ Цифровая трансформация электроэнергетики. – Dzen.ru. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/YcGay67U2kmOyYFR> (дата обращения: 06.11.2023).

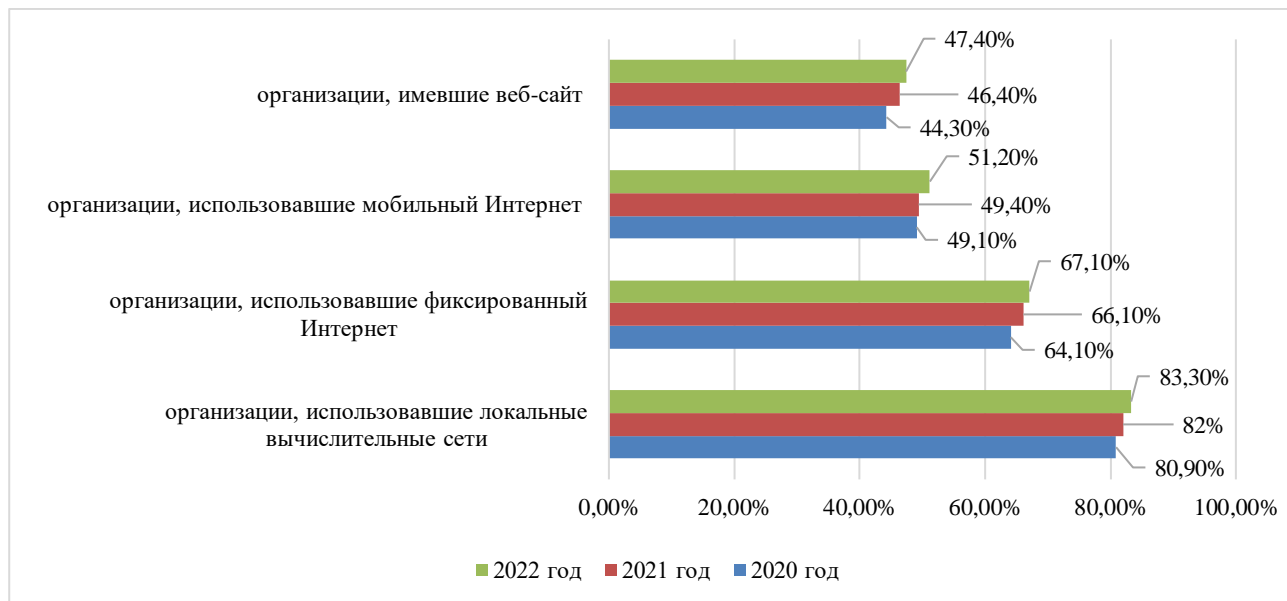


Рисунок 1. Динамика использования информационно-коммуникационных технологий в организациях производства и распределения электроэнергии в России за 2020-2022 гг., % [3]

Figure 1. Dynamics of the use of information and communication technologies in organisations of electricity generation and distribution in Russia in 2020-2022, % [3]

паний энергетического сектора) должна быть ориентирована, в том числе, на инициирование инноваций в работе компании, причем, на стимулирование интереса к саморазвитию и созданию инноваций (процесных, организационных и т.д.) [5]. Т. Каграманова, М. Казначеева отмечают, что на каждом этапе экономического развития в рамках стратегии развития организации акцент делается на мотивации персонала в части создания инноваций, роста производительности труда [6]. М. Ченцова также полагает, что для сотрудников промышленных предприятий система мотивации должна выстраиваться на основании нацеленности на самосовершенствование и совершенствование процессов, качественных характеристик бизнес-

процессов [7]. А. Бобрик, Г. Шавкун считают, что в современной ситуации основными профессиональными характеристиками, компетенциями, которые востребованы применительно к сотрудникам, относят умение креативно мыслить, проявлять инициативу, брать на себя ответственность и грамотно делегировать полномочия, знания относительно специфики отрасли и именно эти качества должны быть положены в основу системы мотивации персонала [8]. Такие авторы, как К. Акинина, О. Рассказова, применительно к энергетическим компаниям, определяют следующую структуру наполнения материального стимулирования сотрудников (рис. 2) [9].

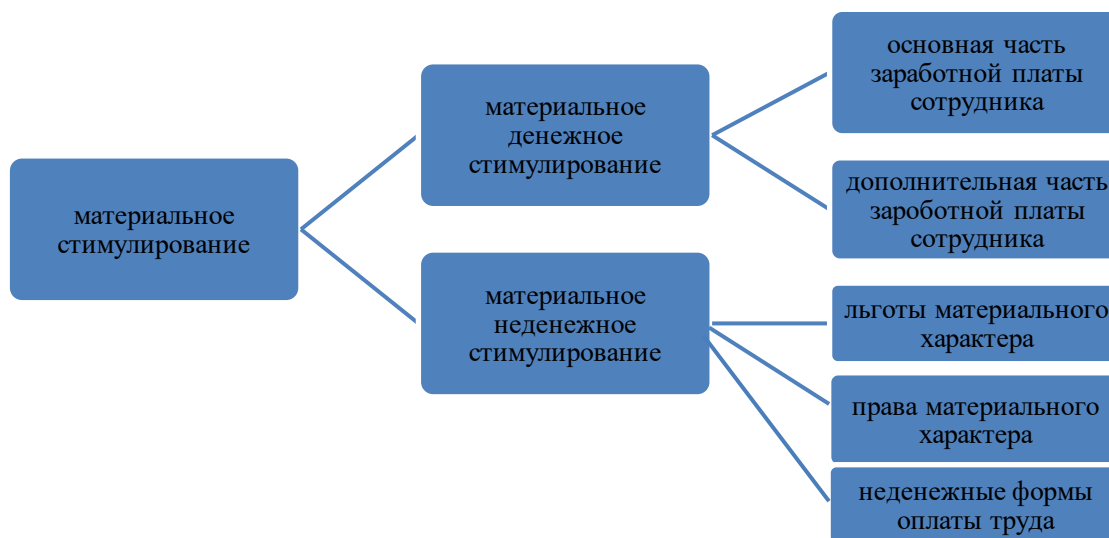


Рисунок 2. Отображение структуры материального стимулирования сотрудников [9]

Figure 2. Representation of material incentive structure of employees [9]

В части основной и дополнительной составляющих заработной платы в каждой компании существуют установленные размеры, тарифы. Также, в части организаций, например, ОАО «Мосэнерго», в Россетях Ленэнерго и т.д. внедрены дополнительные выплаты сотрудникам, которые выступают наставниками для молодых специалистов, адаптирующихся в компании (а именно, доплаты назначаются на период обучения и адаптации специалиста до сдачи им соответствующего экзамена – 15% от оклада и за каждого прикрепленного обучающегося – до 25% от оклада)².

К направлениям нематериального денежного стимулирования относят страхование жизни и здоровья сотрудников, страховку от несчастных случаев, частичную оплату услуг ЖКХ, компенсацию затрат на проезд, связь, компенсационные выплаты в связи с погребением родственников, уходом за находящимися на попечении инвалидами, выплаты в связи с различными событиями в жизни сотрудников, например, при вступлении в брак, рождении ребенка или, напротив, в трудной материальной ситуации. Ряд компаний также осуществляют выделение средств на компенсацию (полную или частичную) аренды жилья или, например, компенсацию на занятия спортом³.

Кроме того, ряд специалистов также отмечают, что ключевым элементом системы мотивации сотрудников компании должны стать именно такие элементы, которые относятся к материальному стимулированию, но не напрямую. Это может быть такое направление, как предоставление расширенного пакета на получение медицинских сервисов (например, предоставление расширенного, дополнительного полиса на стоматологические услуги, расширенное обследование, анализы, страхование жизни и здоровья и т.д.). Другим примером является организация отпуска (с полной или частичной компенсацией работодателя) для сотрудника и/или членов его семьи. Также востребованными могут быть примеры компенсации транспортных расходов (при поездках на работу и с работы или при поездках в отпуск, когда сотруднику раз в год полностью погашается цена дороги в путевке). Важным элементом повышения мотивации, обеспечивающей профессиональное развитие и реализацию интенций на карьерный рост, является такая составляющая, как обучение за счет компании (в цифровом формате, без отрыва от выполнения трудовых обязанностей или, напротив, стажировки, связанные с переездом в подразделения компании для обучения в необходимых полевых условиях). Обучение напрямую корреспондирует с подготовкой специалистов для участия в цифровой трансформации, вовлечении сотрудников в положительные преобразования и внедрение инноваций на благо собственному профес-

сиональному и карьерному росту и компании, в целом.

Нематериальное стимулирование (в том числе, акцент на сопричастности к целям и задачам организации, повышение профессионального статуса и самооценки и т.д.) может быть проиллюстрировано следующим образом (рис. 3). К стимулирующим мерам морального характера применительно к энергетическим компаниям принято относить информирование

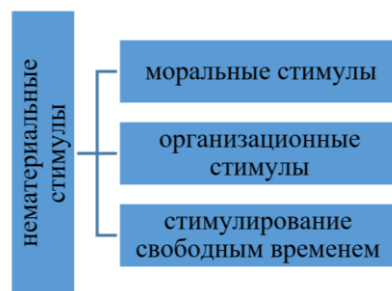


Рисунок 3. Направления нематериального стимулирования сотрудников энергетических компаний в России [9]
Figure 3. Areas of non-material incentives for employees of energy companies in Russia [9]

сотрудников во всех важных шагах, текущих и планируемых в жизни организации, что дает возможность продемонстрировать их сопричастность интересам компании и значимость их участия в планировании и реализации изменений. Не менее значимыми являются совместные мероприятия, как развлекательного, так и профессионального характера, а именно: спортивные и досуговые, развлекательные мероприятия, а также конференции, панельные дискуссии, экспертные обсуждения и т.д. Важным элементом является признание опыта специалиста в коллективе, который готов эффективнее и с большей отдачей трудиться, в случае, когда кроме материального стимулирования оцениваются и становятся гласными его достижения в коллективе и он получает также признание и моральное удовлетворение.

Организационные стимулы строятся в энергетических компаниях на основе удовлетворенности своим местом, статусом на рабочем месте и выполнением трудовых функций. В этом случае имеет значение повышение качества условий труда, непосредственного места работы. Однако, работники отрасли отмечают, что в настоящее время они не в полной мере довольны условиями труда, в особенности, применительно к рабочим местам, сопряженным с вредными условиями труда [9].

Важным элементом мотивации являются усилия по управлению карьерой сотрудников. Существенную роль играет принятие решений по формированию кадрового резерва, обучению в направлении реализации интенции карьерного роста возможным вариантом является создание разветвленной структуры, содержащей большое количество вакантных должностей, которые могут выступить стимулом для сотрудников, желающих повышения по карьерной лестнице.

² Россети Ленэнерго. – Режим доступа: <https://rosseti-lenenergo.ru> (дата обращения: 06.11.2023); Петроэлектросбыт. Режим доступа: <https://www.pes.spb.ru/> (дата обращения: 06.11.2023)

³ Россети СК ЕЭС. – Режим доступа: <https://www.fsk-ees.ru/> (дата обращения: 06.11.2023).

Не менее значимым является вариант стимулирования за счет предоставления дополнительного свободного времени, так как это позволяет, либо больше отдыхать, либо работать по индивидуальному гибкому графику. В ряде организаций, например, «Петроэлектросбыт» гибкий график работы дается водителям и стажерам, которые адаптируются к работе в компании ⁴.

Рассмотрим подробнее систему мотивации Госкорпорации «Росатом». Данная организация проводит мотивирующую политику, предусматривающую выплату сотрудникам конкурентной заработной платы и высокий уровень социальных гарантий (медицинское страхование, корпоративные кредитные программы, пенсионные программы, санаторно-курортное лечение и отдых, семейные программы и др.). Основная цель системы вознаграждения и компенсаций Росатома – обеспечить привлечение, удержание и эффективное вознаграждение работников, необходимых для достижения стратегических задач. Система мотивации базируется на таких принципах, как ответственность каждого работника/подразделения за измеримый результат и зависимость вознаграждения от индивидуальных результатов работы. Всем работникам в зависимости от качества работы и личного потенциала обеспечиваются возможности профессионального развития и карьерного роста.

Управление эффективностью деятельности – процесс, нацеленный на повышение эффективности работы сотрудников Госкорпорации и ее организаций. Эта цель достигается благодаря формированию единых принципов и инструментов постановки и оценки достижения ключевых показателей эффективности (KPI) работников, а также уровня развития их компетенций. Управление эффективностью деятельности выполняет такие задачи, как:

- декомпозиция стратегических целей Росатома на все уровни управления, и обеспечение взаимосвязи с KPI работников;
- фокусирование деятельности работников на достижении целевых значений KPI;
- эффективное вознаграждение работников;
- подготовка рекомендаций для формирования кадрового резерва;
- планирование обучения и развития работников (формирование индивидуальных планов развития).

Госкорпорация создает все условия для продвижения и роста своих сотрудников [10]. Система кадрового резерва предоставляет ее участникам преимущество при назначении на вакантные должности и участие в наиболее важных проектах. Осуществляется обучение и развитие сотрудников (по общеотраслевым программам, индивидуальным планам развития). Всем заинтересованным работникам предлагается участие в реализации инновационных проектов.

Построение модели мотивации персонала для энергетической компании с учетом использования возможностей передовых цифровых технологий

Учитывая необходимость учета различных квалификационных требований к сотрудникам, относящимся к разным уровням иерархии в организации, необходимо для дифференцированных групп сотрудников, для которых разрабатывается система мотивации, учитывать особенности их личных и профессиональных интересов, интенций в профессиональном и карьерном росте, оценку собственной успешности в глазах общества и коллектива, а также механизмы значимого с их точки зрения поощрения. Именно это сможет стать залогом их удовлетворенности и саморазвития на благо компании, а также участия (согласно их функциональным обязанностям) в развитии инноваций (организационных, управленческих, процессных, маркетинговых и т.д.) [11].

Существует следующая, предложенная в теории управления модель структуры мотивации персонала, в которой выделяются субъект и объект, а также ресурсы и механизмы взаимодействия и стимулирования к продуктивному труду сотрудников (рис. 4). Поясним, что на наш взгляд, данная визуализация дает общее представление о процессе организации мотивировки персонала. Так, в ней не указана дифференциация на различные группы: управленцы высшего и среднего звена, квалифицированный персонал разных категорий (рабочие функции которого предполагают самостоятельность принятия решений в зоне ответственности), персонал, задействованный в выполнении только рутинизированных функций. Она может только подразумеваться в формулировке, касающейся личных качеств и компетенций, но в явной форме не проговаривается. Вместе с тем, на представляется, что необходимо изначально предусматривать несколько вариантов (типовых) между субъектом мотивации и объектами данного процесса взаимодействия. Это позволит дифференцировать предложение для сотрудников в части характеристик рабочего места, рабочего процесса, предложения действенных материальных и нематериальных стимулов.

Наиболее значимым в этом процессе является взгляд на сотрудников, как на актив компании, а не как на ресурсное обеспечение, поскольку в этом случае – осознании ведущей роли в успешной работе компании ее персонала – не возникает желания экономики на сотрудниках, а, напротив, на их адаптацию к работе, обучение, стимулирование к продуктивному труду и саморазвитию во благо организации, выделяются адекватные бюджеты. В этом случае обоснованным является использование идейных установок маркетинга персонала [13] в качестве базиса построения системы мотивации, поскольку в этом случае, как мы ранее отмечали, сотрудники становятся внутренними клиентами организации и в работе с ними учитываются их потребности, их предпочтения. Поскольку, в теории маркетинга основу планируемых и реализуемых стратегических усилий составляет клиент и его потребности, которые компания наилучшим образом, чем конкуренты, удовлетворяет, то взгляд на взаимоотношения с сотрудниками переосмысливается.

⁴ Петроэлектросбыт. – Режим доступа: <https://www.pes.spb.ru/> (дата обращения: 11.02.2024).



Рисунок 4. Визуализация общей модели мотивации персонала [12]
Figure 4. General staff motivation model visualisation [12]

Для получения их максимальной вовлеченности в работу организации, участия в перспективных преобразованиях и стремлении продуцировать инновации, проводятся исследования их удовлетворенности, понимания ими «идеального» места работы, желаний, профессионального роста и карьерных амбиций. Естественным образом, все это уточняется, анализируется и тестируется, а также при адаптации к практической работе компании реализуется, но, по отношению только к тем сотрудникам, которые, реально представляют ценность для организации. Данный фактор подразумевает не только исследование ожиданий сотрудников, но и работу специалистов по персоналу, а также штатных психологов с сотрудниками для выявления и адаптации в коллективе тех, кто действительно разделяет ценности организации, готов развиваться вместе с ней, к кому приложение необходимых усилий работодателя будет оправданными. Это системная работа в области HR-маркетинга компании. В этом случае, общий подход к построению системы мотивации можно визуализировать следующим образом (рис. 5).

Приведенный выше подход предполагает систематическую работу в части привлечения специалистов и оценки эффективности их работы, вовлеченности, удовлетворенности и потенциальной пользы для компании – работодателя. Это, в свою очередь, подразумевает необходимость обработки большого массива информации и предполагает использование передовых цифровых технологий. Опыт такого их применения уже нашел себя, как в подготовке инженерных специалистов [14], так и в выстраивании подхода к управлению работой организации, в том числе, в энергетической сфере [15].

Так, сегодня согласно исследованию, проведенному компанией Deloitte «Международные тенденции в сфере управления персоналом» передовые цифровые технологии, искусственный интеллект уже активно применяются в менеджменте организаций (рис. 6). Как видим, в перспективности использования передовых цифровых технологий при планировании будущего организации убеждено подавляющее большинство специалистов, также в вопросах привлечения талантливых сотрудников, их отборе, необходимом обучении и выявлении лидерства в организации, а также в обеспечении равных возможностей для сотрудников в построении карьерной траектории. Отметим, что согласно представленным данным такое направление, как автоматизация HR является востребованным. Конечно, все процедуры и взаимодействие с персоналом нельзя и не следует автоматизировать, однако на основании ИИ уже сегодня делаются продуктивные попытки к отслеживанию, фиксации и аналитике поведения сотрудников и потенциальных претендентов на работу в организации, что дает возможность (еще до работы с психологом и специалистом кадровой службы) отсекающих неподходящих кандидатов. Например, на основании Big Data строятся алгоритмы, согласно которым оцениваются потенциальные сотрудники среди разместивших вакансии на специальных кадровых ресурсах в социальных сетях, что дает возможность осуществлять отбор кандидатов, с которыми целесообразно проводить собеседование, поскольку есть предварительный прогноз о том, что они (согласно оценочным характеристикам) проработают в компании длительный период времени и их ценностные карьерные тенденции совпадают с задачами компании.



Рисунок 5. Уточненный подход к построению системы мотивации сотрудников в компании [составлен авторами]
Figure 5. Specified approach to building an employee motivation system in a company [compiled by the authors]

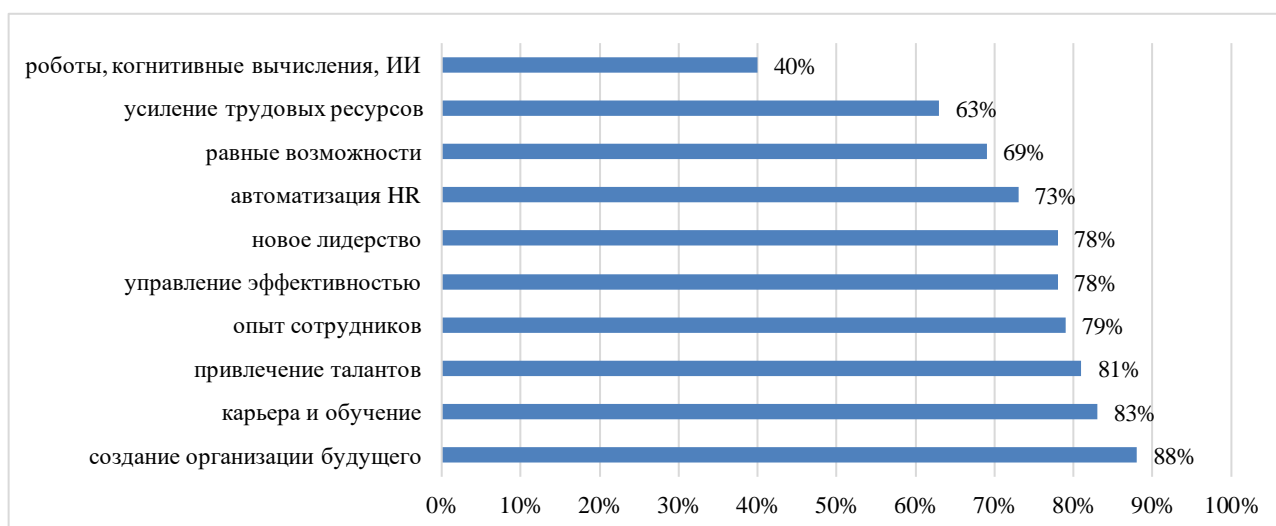


Рисунок 6. Выявленные тенденции в использовании передовых цифровых технологий в управлении персоналом, % (отмечена значимость каждого направления в доле от 100%)⁵
Figure 6. Identified trends in the use of advanced digital technologies in HR management, % (the importance of each trend as a proportion of 100% is noted)⁵

⁵ Международные тенденции в сфере управления персоналом — 2020 – Режим доступа: https://delovoyimir.biz/res/upload/columns/Deloitte_HR-trends-2020_RU.pdf?ysclid=ltmoqzave6583741285 (дата обращения: 14.10.2023)

Также искусственный интеллект применяется в тестировании сотрудников, обработке результатов оценки траектории их поведения в нештатной ситуации, что востребовано для организаций энергетического сектора. Можно привести пример из зарубежного опыта – сотрудничества ExxonMobil с Microsoft в части применения передовых цифровых технологий для привлечения и удержания сотрудников, задействованных в проекте по разработке сланцевой нефти [15]. В России проекты по применению передовых цифровых технологий в оптимизацию работы сотрудников внедрил ПАО «Лукойл», который стремится оптимизировать численность персонала, его применение по назначению и развитие креативности ⁶.

Выводы

На основании приведенного выше материала мы можем сформулировать, что построение системы мотивации сотрудников для компаний энергетического сектора имеет одно из ключевых значений в современных условиях. Во-первых, это связано в том, что в ряде организаций нет полной удовлетворенности сотрудниками своих позиций и условий выполнения трудовых функций, во-вторых, в настоящее время от удовлетворенности персонала, его вовлеченности, развития профессиональных компетенций и совпадения интересов сотрудников с целями организации зависит ее успех. В энергетической сфере к персоналу предъявляются запросы не просто на качественное выполнение своих трудовых функций, а на участие в преобразованиях компании в условиях цифровизации, содействуя внедрению инноваций в рамках функционала и компетенций определенного работника, то есть поощряется проявление инициативы, исходящей от сотрудников.

Это детерминирует рассмотрение сотрудников организации с позиции маркетинга персонала, а именно их восприятия, не как одного из ресурсов компании, а как ее ценностного актива, рост вовлеченности которого идет во благо достижению поставленных целей и задач. Это предполагает изменение подхода к системе мотивации персонала, а именно, в ней необходимо усиливать персонализированный компонент. Мы понимаем под этим не просто дифференциацию материальных (денежных и не денежных) и не материальных стимулов для сотрудников разных категорий, а также глубокую аналитическую проработку потребностей в сотрудниках (и их желаемых характеристиках) в текущей ситуации и на перспективу, оценку ожиданий и совпадения данных ожиданий от условий работы и стимулирования у действующих сотрудников, и ожиданий претендентов на рынке труда. Помимо аналитических усилий и принятия управленческих решений по формированию рабочего места и условий труда для сотрудников разных категорий, и тестирования

понимания ими предложения «идеального» рабочего места от работодателя, необходимо также индивидуализировать его от лица компании-работодателя каждому конкретному специалисту, исходя из его интересов, профессиональных устремлений и потенциальной расширенной (от его вовлеченности и приложенности к сфере интересов) пользы для компании.

Такой подход позволит концентрироваться на стимулах, материальных и нематериальных, ориентированных на каждого конкретного специалиста, согласно его роли, вкладу и перспективности для организации. Конечно, материальные стимулы (в особенности, в денежной форме) для сотрудников энергетических компаний определяются согласно их положению в карьерной иерархии, занимаемой должности и функциональных обязанностях. Однако, уже материальные не денежные стимулы могут (при равных размерах в пересчете на денежный эквивалент) отличаться в зависимости от интересов сотрудника, его потребностей (в образовании, занятиях спортом, обследованиях, хобби и т.д.) и потребностей членов его семьи. Нематериальное стимулирование, связанное с формальным и неформальным статусом, личным брендом сотрудника в организации также должно быть индивидуализировано. Важной доминантой, которая учитывается в компании при стимулировании сотрудников, должна быть их ориентация на профессиональное развитие и предложение усовершенствований в компании в рамках своих компетенций. Этот подход предполагает серьезную кадровую работу с привлечением специалистов – психологов, а также использованием передовых цифровых технологий, в том числе решений в сфере искусственного интеллекта, поскольку опосредует необходимость обработки данных о потенциальных соискателях для работы в компании (их расширенного профиля, как личности и профессионала, нахождения пересечений с интересами компании и направлений полезного функционирования в ней), а также обработку массива информации об уже действующих сотрудниках для определения их реального вклада в развитие компании, результативности на текущем месте работы и выработки индивидуализированных мотивационных предложений с последующим замером результативности их трудовой деятельности.

⁶ Баталов Д. Цифровизация как ключевой фактор успеха в нефтегазовой отрасли. ЛУКОЙЛ, 24 с. – Режим доступа: https://itforum.admhmao.ru/upload/iblock/a56/2_batalov.pdf (дата обращения: 15.11.2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бондаренко В.А. Вопросы адекватности менеджмента современным экономическим реалиям: корневые причины и основные тенденции. *Менеджмент в России и за рубежом*. 2013;5:118–125. Режим доступа: <https://www.mevriz.ru/annotations/2013/5/> (дата обращения: 09.11.2023).
Bondarenko V.A. The questions of management adequacy to modern economic reality: the root causes and basic tendencies. *Management in Russia and abroad*. 2013;5:118–125. (In Russ.) Available at: <https://www.mevriz.ru/annotations/2013/5/> (accessed: 09.11.2023).
2. Бондаренко В.А. Этюды диалектики лояльности внутрифирменного персонала. *Практический маркетинг*. 2006;6(112):10–14. Режим доступа: https://bci-marketing.ru/pm06_06.htm (дата обращения: 09.11.2023).
Bondarenko V.A. Etudy dialektiki loyalti intrafirm personnel. *Practical marketing*. 2006;6(112):10–14. (In Russ.) Available at: https://bci-marketing.ru/pm06_06.htm (accessed: 09.11.2023).
3. Иваненко О.Б., Головкина Е.В. Цифровая трансформация российской электроэнергетики: перспективы и ограничения. *Экономика, предпринимательство и право*. 2023;13(11):5063–5076. <https://doi.org/10.18334/epp.13.11.119863>
Ivanenko O.B., Golovkina E.V. Digital transformation of the Russian electric power industry: prospects and limitations. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo*. <https://doi.org/10.18334/epp.13.11.119863>
4. Шакирьянова Э.И. Эффективные мотивационные механизмы. *Научные исследования*. 2018;7:26–28. Режим доступа: <https://scientificresearch.ru/images/PDF/2018/26/scientific-research-7-26.pdf> (дата обращения: 09.11.2023).
Shakiryanova E.I. Effektivnyye motivatsionnyye mekhanizmy. *Nauchnye issledovaniya*. (In Russ.) Available at: <https://scientificresearch.ru/images/PDF/2018/26/scientific-research-7-26.pdf> (accessed: 09.11.2023).
5. Звездиллин А.Ю. Исследование мотивации персонала в условиях инновационного развития бизнеса. Невинномысск, 2008. 138 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004317872> (дата обращения: 09.11.2023).
Zvezdililn A.Yu. Issledovanie motivatsii personala v usloviyakh innovatsionnogo razvitiya biznesa. Nevinnomyssk, 2008. 138 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004317872> (accessed: 09.11.2023).
6. Каграманова Т.И., Казначеева М.Г. Мотивация персонала как актуальная проблема современности. *Мир науки, культуры, образования*. 2016;3:200–202. Режим доступа: <http://amnko.ru/index.php/russian/journals/> (дата обращения: 09.11.2023).
Kagramanova T.I., Kaznacheeva M.G. Motivation of staff as a current problem. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*. 2016;3:200–202. (In Russ.) Available at: <http://amnko.ru/index.php/russian/journals/> (accessed: 09.11.2023).
7. Ченцова М.В. Современная концепция инновационного развития и формирования «экономики знаний»: проблемы теоретического анализа. Инновационная экономика: материалы I Международной научной конференции, 20–23 октября 2014 г. Казань: Бук, 2014. С. 3–6. Режим доступа: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/130/6107/> (дата обращения: 09.11.2023).
Chentsova M.V. Sovremennaya kontseptsiya innovatsionnogo razvitiya i formirovaniya «ekhonomiki znanii»: problemy teoreticheskogo analiza. *Innovatsionnaya ekhonomika: materialy I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*, 20–23 oktyabrya 2014 g. Kazan': Buk. 2014. S. 3–6. (In Russ.) Available at: <https://moluch.ru/conf/econ/archive/130/6107/> (accessed: 09.11.2023).
8. Бобрин А.А., Шавкун Г.А. Инновационный подход к мотивации персонала предприятий автомобилестроения в условиях осуществления внешнеэкономической деятельности. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки*. 2019;4(2):213–220. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2019-4-2-213-220>
Bobrik A.A., Shavkun G.A. Innovative Approach to Motivation of Personnel of Automotive Industry Enterprises in the Conditions of Foreign Economic Activity. *Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic sciences*. 2019;4(2):213–220. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2019-4-2-213-220>
9. Аникина К.О., Рассказова О.А. Особенности мотивации и стимулирования персонала на предприятиях электроэнергетики. *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. 2021;55:89–104. <https://doi.org/10.17223/19988648/55/6>
Akinina K.O., Rasskazova O.A. Features of Personnel Motivation and Incentivization in the Electric Power Industry. *Tomsk state university journal of economics*. 2021;55:89–104. <https://doi.org/10.17223/19988648/55/6>
10. Гречкин Е.И., Попова Т.С. Особенности организации труда на предприятии (на примере филиала АО «АЭМ-технологии» Атоммаш» в Г. Волгодонск). Современные подходы к трансформации концепций государственного регулирования и управления в социально-экономических системах: Сборник научных трудов 12-й Международной научно-практической конференции. В 3-х томах. Курск, 21–22 февраля 2023 года. Том 1. Курск: Курский филиал Финансового университета при Правительстве РФ, 2023. С. 167–170. EDN KSWDVT. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_50411488_57582833.pdf (дата обращения: 09.11.2023).
Grechkin E.I., Popova T.S. Features of the organization of labor at the enterprise (on the example of the branch of JSC «AEM-technologies» Atommash» in Volgodonsk). *Sovremennyye podkhody k transformatsii kontseptsii gosudarstvennogo regulirovaniya i upravleniya v sotsial'no-ekhonomiceskikh sistemakh: Sbornik nauchnykh trudov 12-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. V 3-kh tomakh. Kursk, 21–22 fevralya 2023 goda. Tom 1. Kursk: Kurskii filial Finansovogo universiteta pri Pravitel'stve RF, 2023. P. 167–170. EDN KSWDVT. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_50411488_57582833.pdf (дата (accessed: 09.11.2023).
11. Бондаренко В.А. Актуальные проблемы создания и внедрения маркетинговых инноваций. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2015;2:16–20. Режим доступа: <http://e-koncept.ru/2015/15028.htm> (дата обращения: 09.11.2023).
Bondarenko V. Actual problems of building and implementing marketing innovation. *Scientific-methodological electronic journal «Koncept»* 2015;2:16–20. (In Russ.) Available at: <http://e-koncept.ru/2015/15028.htm> (accessed: 09.11.2023).
12. Пугачев В.П. Модель эффективного использования методов мотивации персонала. *Вестник Московского университета. Серия 21. Управление (государство и общество)*. 2017;2:44–67. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_29429301_60145394.pdf (дата обращения: 09.11.2023).
Pugachev V.P. Model of effective use of methods of staff motivation. *Lomonosov Public Administration Journal. Series 21*. 2017;2:44–67. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_29429301_60145394.pdf (accessed: 09.11.2023).

13. Бондаренко В.А., Зубарева Н.Н., Чисников В.А. Вопросы востребованности маркетинга персонала в здравоохранении России. *Маркетинг в России и за рубежом*. Режим доступа: 2021;2:67–74. <http://www.mavriz.ru/annotations/2021/2/> (дата обращения: 09.11.2023).

Bondarenko V.A., Zubareva N.N., Chisnikov V.A. Questions of the demand for personnel marketing in healthcare of Russia. *Journal of marketing in Russia and abroad*. (In Russ.) Available at: <http://www.mavriz.ru/annotations/2021/2/> (accessed: 09.11.2023).

14. Грабова О.Н., Грабов А.В. Цифровая экономика для инженерных направлений как основа будущих компетенций в управлении промышленным предприятием. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки*. 2019;4(1):56–62. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2019-4-1-56-62>

Grabova O.N., Grabov A.V. Digital economy in engineering as a basis for future competences in the process of industrial plant management. *Bulletin of Kemerovo state university. series: Political, sociological and economic sciences*. 2019;4(1):56–62. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2019-4-1-56-62>

15. Шевелёва А.В., Шевелёв В.С. Практика применения искусственного интеллекта в сфере управления персоналом нефтегазовых компаний. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки*. 2019;4(3):354–360. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2019-4-3-354-360>

Sheveleva A.V., Shevelev V.S. Practical application of artificial intelligence in human resource management of oil and gas companies. *Bulletin of Kemerovo state university. series: Political, sociological and economic sciences*. 2019;4(3):354–360. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2019-4-3-354-360>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бондаренко В.А. – анализ существующих подходов к мотивации персонала в энергетических компаниях, написание текста статьи, формулирование выводов;

Пржедецкая Н.В. – исследование потенциала использования передовых цифровых технологий в управлении, концептуализация статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Bondarenko V.A. – analysis of existing approaches to staff motivation in energy companies, writing the text of the article, formulating conclusions;

Przhedetskaya N.V. – research of the potential of using advanced digital technologies in management, conceptualization of the article.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

FUNDING:

The study had no external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Виктория Андреевна Бондаренко, доктор экономических наук, профессор, зав. кафедрой маркетинга и рекламы, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2921-7548>

e-mail: b14v@yandex.ru

Наталья Витовна Пржедецкая, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономической теории, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4550-6649>

e-mail: nvpr@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Victoria A. Bondarenko, Dr. Sci. (Ecom.), Professor, Head of the Department of Marketing and Advertising, Rostov State University of Economics (RINH), Rostov-on-Don, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2921-7548>

e-mail: b14v@yandex.ru

Natalia V. Przhedetskaya, Dr. Sci. (Ecom.), Professor, Professor of the Department of Economic Theory, Rostov State University of Economics (RINH), Rostov-on-Don, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4550-6649>

e-mail: nvpr@bk.ru

Поступила в редакцию 20.11.2023

После доработки 05.03.2024

Принята к публикации 14.03.2024

Received 20.11.2023

Revision 05.03.2024

Accepted 14.03.2024

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

УДК 621.039:338.45





<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-14>

EDN YPFAIJ


Оригинальная статья / Original paper



**Технико-экономическое обоснование мероприятия по освоению
новой технологии изготовления тонкостенных крупногабаритных днищ
методом фланжирования (в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии»
«Атоммаш» в г. Волгодонск)**

Т.С. Попова¹  , О.И. Карпова², А.А. Попов² , А.Д. Пахоруков¹ 

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

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

Аннотация. В качестве объекта исследования в данной статье был выбран Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск – организация, которая была спроектирована и введена в эксплуатацию в 1976 г., как головное машиностроительное предприятие по производству полного комплекта корпусного и теплообменного оборудования энергоблока АЭС в объеме ядерного острова. Предметной областью выбрана организация производства крупногабаритной продукции, которое предприятие намерено диверсифицировать за счет приобретения линии для изготовления тонкостенных днищ крупногабаритных корпусов сосудов под давлением для АЭУ и нефтегазохимии. Цель исследования – на основе анализа существующих технологий и способов производства продукции разработать проект по освоению новых технологических мощностей, что позволит увеличить эффективность производственной деятельности в Филиале АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск. В качестве основных методов при написании статьи выступили теоретический анализ научной литературы по проблематике исследования, графический метод и изучение локальной документации объекта исследования в части модернизации производственных мощностей. Основным результатом исследования выступает вывод о необходимости внедрения новой технологии – холодного проката (фланжирования) в целях расширения технологических возможностей предприятия, повышения эффективности производства в данной сфере, получения прибыли от поставок тонкостенных днищ сосудов в адрес других предприятий на замену европейским поставщикам, и как следствие – увеличение конкурентного преимущества.

Ключевые слова: машиностроительное предприятие, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, изготовление тонкостенных крупногабаритных днищ методом фланжирования, технико-экономическое обоснование проекта, модернизация производства, конкурентоспособность.


Для цитирования: Попова Т.С., Карпова О.И., Попов А.А., Пахоруков А.Д. Технико-экономическое обоснование мероприятия по освоению новой технологии изготовления тонкостенных крупногабаритных днищ методом фланжирования (в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск). *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):111–122. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-14>

For citation: Popova T.S., Karpova O.I., Popov A.A., Pakharukov A.D. Feasibility study of measures to master a new technology for manufacturing thin-walled large-size bottoms by flanging (in conditions of «Atommash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgondonsk). *Global nuclear safety*. 2024;14(1):111-122 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-14>

**Feasibility study of measures to master a new technology for manufacturing thin-walled
large-size bottoms by flanging (in conditions of «Atommash» the branch
of «AEM-Technologies» JSC in Volgondonsk)**

Tatiana S. Popova¹  , Olga I. Karpova², Andrey A. Popov² ,
Alexey D. Pakhorukov¹ 

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

² «Atommash» the branch of «AEM-technologies» JSC, Volgondonsk, Rostov region, Russian Federation
 TSPopova@mephi.ru

Annotation. The object of research in this article is the «Atomash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonsk, an organisation that was designed and commissioned in 1976 as the head machine-building enterprise for the production of a complete set of hull and heat-exchange equipment for NPP power unit in the volume of the nuclear island. The subject area chosen is the organisation of production of large-size products, which the enterprise intends to diversify through the acquisition of a line for the manufacture of thin-walled bottoms of large-size pressure vessel housings for NPPs and oil and gas chemistry. The purpose of the research is to develop a project for the development of new technological capacities based on the analysis of existing technologies and methods of production, which will increase the efficiency of production activities at the «Atomash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonsk. The main methods in writing the article were theoretical analysis of scientific literature on the research problem, graphical method and study of local documentation of the research object in terms of modernisation of production facilities. The main result of the research is the conclusion about the necessity of introducing a new technology – cold rolling (flanging) in order to expand the technological capabilities of the enterprise, to increase the efficiency of production in this area, to gain profit from the supply of thin-walled vessel bottoms to other enterprises to replace European suppliers, and as a consequence an increase in competitive advantage.

Keywords: machine-building enterprise, the «Atomash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonsk, manufacture of thin-walled large-sized bottoms by flanging, feasibility study of the project, modernization of production, competitiveness.

Введение

В современных условиях дефицита многих видов ресурсов и ужесточающихся требований обеспечения конкурентоспособности в условиях конкретного машиностроительного предприятия, конкурентным можно считать тот технологический процесс, от реализации которого организация сможет получить максимальный положительный эффект. Этот эффект может быть выражен в виде роста чистой прибыли, снижении себестоимости продукции, повышении производительности труда, снижении трудоемкости, повышении качественных характеристик продукции. Другими словами, определенный набор требований к обеспечению конкурентоспособности продукции диктует свои запросы при проектировании техпроцесса, а не наоборот. В работе будет произведено сравнение двух технологий, используемых при изготовлении тонкостенных крупногабаритных днищ – метода фланжирования (холодной раскатки) и метода горячей штамповки, и предпринята попытка экономического обоснования освоения Филиалом АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск новой технологии изготовления тонкостенных днищ крупногабаритных корпусов сосудов под давлением.

Материалы и методы

В качестве основных методов при написании статьи выступили анализ и обобщение материалов, опубликованных в научной литературе по проблематике исследования. В работах большого числа авторов вопросу важности постоянного совершенствования технического и технологического обеспечения производственных процессов в условиях машиностроительного предприятия уделяется должное внимание.

Так, к примеру, Стадников С.В. в своих работах обосновывает необходимость и важность планирования развития производственных мощностей машиностроительных предприятий для достижения ими долгосрочных производственных и финансовых успехов [1]. Самигуллин И.Г. в своих исследованиях указывает на принципиальную значимость технологического развития машиностроительного комплекса, поскольку именно с его помощью формируется инновационно-технический потенциал для деятельности других отраслей промышленности [2]. Такие авторы как Савельева Е.В. и Чернов В.Ю. приводят доводы в пользу

актуальности повышения качества продукции машиностроительной отрасли с помощью совершенствования технологического процесса как такового и отдельных его операций [3]. В свою очередь Дорошенко Ю.А. и Климашевская А.А. утверждают, что осуществление технологической модернизации на промышленном предприятии имеет большое значение для повышения его конкурентоспособности как на отечественном, так и на зарубежном рынках [4].

Крылова И.Ю., рассматривая в своих трудах особенности организации машиностроительного производства, определяет их влияние на процесс формирования затрат при изготовлении продукции в данной материалоемкой отрасли [5]. Схожие научные и прикладные интересы можно увидеть у таких авторов как Актуганова А.С. и Ванюкова Р.А. [6], а также Золотарева Г.И. и Язикова О.В. [7]. Данные ученые рассматривают в своих исследовательских работах приемы и методы совершенствования порядка учета затрат на производство продукции на предприятиях отрасли машиностроения, а также нововведения, позволяющие усовершенствовать данный учет.

В материалах работ Васильева А.В. затрагивается вопрос об актуальности внедрения бережливого производства на российских машиностроительных предприятиях, рассматриваются проблемы, с которыми сталкиваются предприятия при внедрении данной концепции [8]. Вайцехович С.М. и Власов Ю.В. предлагают и описывают пути оптимизации технологических процессов, устанавливая зависимости между экономическими показателями деятельности машиностроительного предприятия и технологическими (техническими) параметрами производства [9]. Грибова Е.И. при проведении оценки влияния факторов производства на выпуск продукции в машиностроении, одну из главных ролей отводит совершенствованию технологии производства [10].

Помимо этого, при написании статьи использовался метод экспертных оценок для разработки проектируемого мероприятия и формирования его технологического и экономического представления. Экспертами выступили сотрудники Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск: главный металлург, ведущий инженер-технолог по металлургии, ведущий специалист по инвестиционному разви-

тию, а также сотрудники планово-экономического управления предприятия.

Обсуждение и результаты

Атомная энергетика уже к концу 1960-х гг. стала привычной частью советских реалий, не «топливом будущего», а обыденной частью народного хозяйства. Не зависящие от регулярного подвоза топлива атомные станции могли располагаться там, где этого требовал потребитель. Постепенно известные во всем мире производители оборудования для АЭС – Завод им. Орджоникидзе (Подольск) и Ижорские заводы (Колпино) перестали справляться с нарастающим спросом.

Промышленность СССР требовала строительства и ввода в эксплуатацию большего количества атомных станций, а значит – новых мощностей для производства оборудования для них. Местом для нового завода был выбран Волгодонск в виду его удачного географического положения. В 1972-74 гг. был разработан и утвержден проект Волгодонского завода тяжелого машиностроения, который уже в начале строительства, с легкой руки одного из корреспондентов газеты, освещавшей данное событие, получил куда более звучное название – «Атоммаш».

На сегодняшний день Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск является крупнейшим производственным объединением атомного энергетического машиностроения России. Под стальным небом колоссальных цехов завода производится продукция для нефтеперерабатывающих, добывающих и энергетических отечественных и зарубежных компаний. Одним из перспективных видов деятельности Филиала можно рассматривать производство и реализацию крупногабаритных днищ для корпусов атомных энергетических установок (АЭУ) и для оборудования нефтегазохимии (НГХ).

Расчет затрат на изготовление днищ методом горячей штамповки. В настоящий момент для обеспечения производства обозначенных изделий методом горячей штамповки в условиях завода используется уникальный в своем роде пресс «ИИ» высотой около 30 метров и усилием 15000 тонн (производства Японии, введенный в эксплуатацию еще в далеком 1980 г.). Данный пресс (рис. 1) развивает усилие в 1000-1500 раз больше, чем давление товарного вагона на рельсы и с многочисленными насадками и матрицами формует из металла толщиной в сотни миллиметров изделия с заданными геометрическими параметрами.

Рассмотрим ныне используемый предприятием технологический процесс изготовления заготовок днищ методом прессования (пресс ИИ): Для изготовления заготовки днища применяют типовую кованую обечайку заданной высоты, толщины и диаметра, поставляемую специализированным предприятием. Основными операциями технологического процесса изготовления штампованного днища КР из кованой обечайки являются:

1. Вырезка сектора от обечайки под заведение пуансона для последующей разгибки в плоскую плиту.

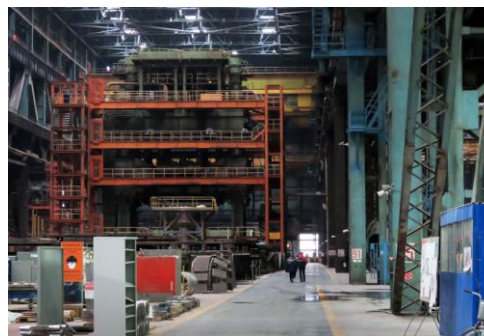


Рисунок 1. Пресс «ИИ» усилием 15000 тонн (Япония), предназначенный для изготовления изделий методом горячей штамповки¹

Figure 1. «ИИ» press of 15000 tonnes force (Japan), designed for manufacturing of products by hot stamping method¹

2. Разгибка кованой обечайки в плиту для последующей штамповки выполняется за несколько переходов в горячем состоянии в интервале температур от 1070 до 800°C. Посад обечайки для нагрева под первый этап разгибки осуществляют в печь при температуре не выше 820°C (800±20°C); выдержка при заданной температуре 1,0-1,5 часа. Далее нагрев печи до температуры под разгибку 1040-1070°C; при этом скорость нагрева – по мощности печи, но не более 100°/час; выдержка в печи 4,0-4,2 часа. Далее в частично разогнутую обечайку заводят более широкую плиту и опускают пуансон в нижнее положение осуществляя дальнейшую разгибку обечайки. Остывшую частично разогнутую обечайку после первого этапа разгибки транспортируют в печь для подогрева до температуры 1040-1070°C выдержка в печи 1,0-1,15 часа. В подогретую для второго этапа разгибки частично разогнутую обечайку заводят более широкую нажимную плиту и осуществляют второй переход – разгибку краев обечайки. Частично разогнутую обечайку разворачивают вокруг своей оси на 90° и производят дальнейшую разгибку обечайки в плиту. В случае неполной разгибки обечайки на втором этапе, требуется выполнить подогрев частично разогнутой обечайки для третьего и четвертого перехода до температуры 1040-1070°C; выдержать в печи 1,0-1,15 часа. При этом суммарное время всех нагре-

¹ Атоммаш. Как работает в нынешней России советский индустриальный гигант. – Субъективный путеводитель. – dzen.ru. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/YWalyzM3O16AsQ6K> (дата обращения: 18.11.2023).

вов/подогревов обечайки в ходе разгибки в плиту не должно превышать 7,5 часов.

3. Отжиг разогнутой плиты для снятия напряжений после деформации проводят в температурном интервале $680\div 700^{\circ}\text{C}$, охлаждение на воздухе.

4. Вырезка из плиты круглой исходной заготовки под штамповку днища. После кислородной вырезки выполняется отпуск кромок в температурном интервале $610\div 630^{\circ}\text{C}$ в течение $4,5\div 5,0$ часов, охлаждение с печью до 400°C со скоростью не более $50^{\circ}\text{C}/\text{ч}$, далее – на воздухе.

5. Штамповка днища. Нагретую заготовку транспортируют от печи к гидравлическому прессу и устанавливают (центрируют) на матрицу штампа для вытяжки; далее опускают пуансон и осуществляют вытяжку.

6. Отжиг после штамповки.

7. Основная термическая обработка, которая состоит из:

– закалки с температур $(900\div 930)^{\circ}\text{C}$, охлаждение в воде до температуры $\leq 100^{\circ}\text{C}$,

– отпуска в температурном интервале $(640\div 680)^{\circ}\text{C}$, охлаждение на воздухе.

8. Отбор проб и образцов.

9. Технологические, послесварочные отпуска. По причине крупных размеров заготовок требуется пред-

варительный их нагрев (доведение металла до необходимой температуры) в специальной печи и последующая «вытяжка» в штампе уже в горячем состоянии (рис. 2).



Рисунок 2. Нагрев заготовки тонкостенного днища с подкладным листом в печи ВД-6Т²

Figure 2. Heating of thin-walled bottom blank with lining plate in VD-6T furnace²

стоит отметить, что нагрев является весьма затратным мероприятием, как по трудоемкости, так и по расходуемым энергоресурсам – газ, вода, электричество (табл. 1), что негативно сказывается на производственных издержках при изготовлении днищ с использованием метода горячей штамповки.

Таблица 1. Объемы потребления энергоресурсов при нагреве одного днища [составлено авторами на основе данных внутренних документов предприятия]

Table 1. Energy consumption for heating one bottom plate [compiled by the authors on the basis of data from enterprise internal documents]

Ресурс	Объемы потребления энергоресурсов	Цена энергоресурса	Затраты, руб.
Природный газ	36342 м ³	8,167 руб./ м ³	296805,114
Электроэнергия	3710 кВт*ч	3,323 руб./ кВт*ч	12328,33
Охлаждающая вода	280 м ³	9,618 руб./ м ³	2693,04
Итого затрат			311826,484

Представленные в таблице 1 расчеты отражают среднюю величину затрат на потребление энергоресурсов при нагреве одной заготовки днища СПАЗ (системы пассивного залива активной зоны) под горячую штамповку и составляют более 311 тыс. рублей.

Согласно производственной программе предприятия в среднем за год осуществляется изготовление не менее 15 тонкостенных днищ для разных типов крупногабаритных изделий, как для атомной отрасли, так и для нефтегазохимии. Зная затраты предприятия на энергоресурсы, потребляемые при нагреве под штамповку одного днища, а также располагая информацией об общем количестве изготавливаемых в течение года единиц, можно рассчитать совокупные затраты по данной статье, которые составят порядка 4,7 млн. руб. (311 тыс. руб. * 15 шт.).

Еще более затратной составной частью технологического процесса изготовления днищ методом горячей штамповки является применение при их производстве дорогостоящей оснастки. Штамповая оснастка для операции вытяжки крупногабаритных днищ на предприятии отсутствует, что требует изготовления сторонними предприятиями соответствующего крупногабаритного штампа (весом от 150 до 300 тонн) на

гидравлический пресс для каждого вида днищ. В комплект штампа входят пуансон, матрица, прижим, вкладыш, прокладки и крепеж. Согласно данным, полученным на предприятии, ориентировочный срок проектирования штампа составляет 1,0-1,5 месяца. Срок его непосредственного изготовления – 1,0-1,5 года.

Стоит отметить, что изготовление штампа – не разовый процесс, поскольку каждый штамп ориентирован только для использования своих параметров производства днищ. Вследствие этого, при необходимости производства днища диаметром и формой, отличными от диаметра и формы имеющейся штамповой оснастки, предприятие ждет потери в виде как временных, так и финансовых ресурсов на производство новой. Ориентировочная стоимость изготовления одного штампа составляет около 132 млн. руб. (табл. 2).

² Атоммаш провел штамповку днища реактора энергоблока № 1 для АЭС «Аккую». 21.01.2019. – АЭМ-технологии Росатом. – Режим доступа: <https://www.aemtech.ru/mediacenter/novosti-aem-technologii/atommash-provel-shampovku-dnishha-reaktora-energobloka-no1-dlya-aes-akkuyu.html> (дата обращения: 18.11.2023).

Таблица 2. Стоимость изготовления одного штампа на крупногабаритное эллиптическое днище [составлено авторами на основе данных внутренних документов предприятия]

Table 2. Production cost of one stamp for large-size elliptical bottoms [compiled by the authors on the basis of data from enterprise internal documents]

Наименование элемента оснастки	Ориентировочная масса детали, тонн	Вид заготовки (ДЦИ)	Срок изготовления заготовки	Цикл обработки (мех. обработка, сварка)	Ориентировочная стоимость*, руб. без НДС
Пуансон	100,0	отливка	6-8 мес.	3-4 мес.	76700000,00
Матрица	40,0	отливка, поковка	6-8 мес.	3-4 мес.	30680000,00
Прижим	32,0	прокат	-	3-5 мес.	24544000,00
Итого руб. без НДС:					131924000,00

*Ориентировочная стоимость одного штампа рассчитана исходя из средней стоимости за 1 кг штамповой оснастки: 767,00 руб. без НДС

В 2024 г. планируется приобретение двух типов-размеров штамповой оснастки под изготовление днищ для сепаратора пароперегревателя и корпуса подогревателя. Следовательно, ориентировочно затраты на штамповую оснастку обозначенных типов составят 264 млн. рублей. Поскольку данные типы оснастки планируется использовать в рамках исполнения контрактных обязательств по изготовлению днищ многократно, то затраты на ее изготовление целесообразно распределить на заданную трехлетним периодом производственную программу (по данным предприятия она составляет 45 единиц (днищ) на период с 2024 по 2026 г.). Следует пояснить, что согласно п. 24 методических указаний по бухгалтерскому учету специального инструмента, специальных приспособлений, специального оборудования и специальной одежды (утверждены приказом Минфина РФ от 26.12.2002 №135н, с изменениями от 25.10.2010 №132н, от 24.12.2010 №186н) стоимость специальной оснастки погашается организацией одним из способов: 1) линейный способ – сумма погашения стоимости оснастки рассчитывается исходя из фактической себестоимости объекта оснастки и норм, исчисленных исходя из сроков ее полезного использования; 2) способ списания стоимости пропорционально объему выпущенной продукции (работ, услуг). В этом случае

сумма погашения стоимости оснастки определяется исходя из натурального показателя объема продукции в отчетном периоде и соотношения фактической себестоимости объекта специальной оснастки к предполагаемому объему выпуска продукции за весь ожидаемый срок полезного использования указанного объекта. Именно данный способ подходит для нашего типа оснастки, непосредственно связанной с количеством выпущенной продукции (днищ). То есть, затраты на оснастку, приходящиеся на изготовление одного днища, в среднем обойдутся предприятию в размере 5,8 млн. руб. (264 млн. руб. / 45 шт.).

Стоит отметить немаловажный факт, поскольку изготовление штамповой оснастки происходит силами сторонних организаций, имеется риск срыва сроков производства как самой оснастки, так и основной продукции Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск для отечественных и иностранных заказчиков, что в свою очередь влечет снижение имиджевой привлекательности и соответствующие штрафные санкции.

Далее произведем расчет трудозатрат на изготовление днищ методом горячей штамповки на гидравлическом прессе «ИНИ» на примере сепаратора пароперегревателя (табл. 3).

Таблица 3. Расчет трудозатрат на изготовление днищ СПП методом горячей штамповки на гидравлическом прессе «ИНИ» [составлено авторами на основе данных внутренних документов предприятия]

Table 3. Calculation of labour costs for manufacturing of superheater separator bottoms by hot stamping on IHI hydraulic presses [compiled by the authors on the basis of data from enterprise internal documents]

Наименование операций	Трудоемкость*, н/ч	Расходы на оплату труда, руб.
Трудоемкость работ по сварке заготовки днища, (н/ч)	226	–
Трудоемкость работ по нагреву заготовки днища в печи перед горячей обработкой давлением, (н/ч)	33	–
Трудоемкость на обработку давлением 1–го днища, (н/ч)	78	–
Трудоемкость работ по термической обработке днища (н/ч)	110	–
Трудоемкость работ связанных с калибровкой в штампе после термической обработки, (н/ч)	70,5	–
Трудоемкость прочих работ, (н/ч)	298	–
Общая трудоемкость на 1 днище	815,5	–
Ориентировочные затраты на оплату труда (1 днище)** при стоимости одного нормо–часа: 3 367,17 руб, руб.	–	2745927,135
Ориентировочные затраты на оплату труда (15 днищ)**, руб. без НДС	–	41188907,03
Взносы в Социальный фонд России (31,3%) – в расчете на 1 днище	–	859475,1933
Взносы в Социальный фонд России (31,3%) – в расчете на 15 днищ	–	12892127,9
итого затрат на программу (15 единиц)	12232,5	54081034,92

*Расчет трудоемкости штамповки днища выполнен по взятому в качестве аналога днищу для корпуса МБИР

**Ориентировочная стоимость изготовления партии днищ в количестве 15 шт. рассчитана исходя из стоимости одного н/ч: 3367,17 руб. без НДС

Произведенные в таблице 3 расчеты показывают, что суммарные затраты на оплату труда рабочих, задействованных в изготовлении днищ СПП методом горячей штамповки на гидравлическом прессе «ИНИ», составят около 54 млн. руб. (в расчете на годовую программу тонкостенных днищ в количестве 15 единиц). Располагая информацией относительно всех элементов затрат предприятия на изготовление днищ методом горячей штамповки, сведем их в таблице 4, что позволит найти полную себестоимость.

Итак, расчеты свидетельствуют о том, что затраты на изготовление одного днища методом горячей

штамповки на гидравлическом прессе «ИНИ» обходятся предприятию в районе 15,3 млн. руб., на годовую программу, состоящую из 15 сборочных единиц, – 229 млн. руб. При калькулировании себестоимости не была учтена стоимость материалов, поскольку в дальнейшем в работе, при расчете себестоимости изготовления днищ методом фланжирования и сравнении между собой двух обозначенных технологий по критерию финансовых затрат, стоимость материалов будет совпадать.

Таблица 4. Калькуляция затрат на изготовление днищ СПП методом горячей штамповки на гидравлическом прессе «ИНИ» [составлено авторами на основе данных внутренних документов предприятия]

Table 4. Calculation of costs for manufacturing of superheater separator bottoms by hot stamping on IHI hydraulic presses [compiled by the authors on the basis of data from enterprise internal documents]

Статья калькуляции	Затраты на 1 днище, руб.	Затраты на годовую программу, руб.
Затраты на энергоресурсы, затрачиваемые на термообработку	311826,484	4677397,26
Затраты на изготовление оснастки	5863288,889	87949333,34
Фонд оплаты труда	2745927,1	41188907,03
Взносы в Социальный фонд России	859475,1933	12892127,9
Накладные расходы (200% от ФОТ)	5491854,27	82377814,05
Итого	15272372	229085579,6

Расчет затрат на изготовление днищ методом фланжирования (холодной раскатки)

Пресс «ИНИ» в виду длительной его эксплуатации (44 года) регулярно нуждается в техническом обслуживании. Кроме того, данное оборудование в ближайшее время будет модернизировано, вследствие чего после его вывода из эксплуатации на период проведения вышеуказанных работ, становится невозможным выполнение заказов по горячей штамповке крупногабаритных днищ в Филиале АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш». Сама модернизация по данным, полученным от специалистов предприятия, займет достаточно длительное время – порядка 1248 дней (3,4 года). А это в свою очередь упущенные выгоды от технической невозможности исполнения заказов.

В ходе изучения рыночной ситуации было установлено, что в рассматриваемой сфере народного хозяйства в связи с уходом зарубежных конкурентов (компаний-производителей крупногабаритных изделий), а также увеличением спроса на данную продукцию со стороны представителей таких отраслей, как нефтегазохимическая, атомная, авиационная и судостроительная промышленности, у завода «Атоммаш» в г. Волгодонске появятся дополнительные потенциальные заказчики. Однако учитывая необходимость скорого вывода прессы «ИНИ» на модернизацию, возникает сложность в исполнении как уже взятых заводом обязательств по изготовлению тонкостенных крупногабаритных днищ, так и потенциальных заказов, в связи с чем необходим поиск решения данной проблемы.

Одной из альтернатив решения проблемы поставки днищ сепаратора пароперегревателя является их закупка по кооперации у европейского поставщика

(Германия), что невозможно на текущий момент по причине санкционной политики в отношении России.

В России же в настоящий момент не существует предприятий, оборудование которых было бы способно раскатывать тонкостенные днища диаметром более 4000 мм методом холодного фланжирования. Учитывая длительный и дорогостоящий процесс изготовления новой штамповой оснастки и нецелесообразность переточки имеющейся уникальной крупногабаритной штамповой оснастки под постоянно меняющуюся номенклатуру тонкостенных крупногабаритных днищ, предлагается рассмотреть возможность приобретения линии по изготовлению тонкостенных днищ (диаметром от 2000мм до 8000мм с толщиной стенки до 60мм). Данная линия позволит освоить и внедрить новую технологию изготовления днищ для сосудов под давлением методом фланжирования с помощью универсальной гибочной оснастки (без изготовления новых штампов) на территории производственной площадки завода «Атоммаш», что позволит занять нишу на рынке, оставленную европейскими поставщиками тонкостенных днищ.

Приобретение линии по холодной раскатке тонкостенных днищ методом фланжирования даст заводу следующие преимущества:

- позволит закрыть потребность Росатома в указанной номенклатуре днищ для корпусов сосудов АЭУ;
- позволит получить прибыль от поставок тонкостенных днищ сосудов НГХ в адрес других предприятий;
- отменит затраты на изготовления дорогостоящей крупногабаритной штамповой оснастки;

– отменит затраты на нагрев заготовок в газовых печах перед обработкой давлением за счет холодного формообразования;

– повысит качество и точность профиля тонкостенных днищ за счет применения холодной обработки давлением вместо горячей;

– повысит безопасность и улучшит условия труда рабочих за счет отмены нагрева заготовок до 1000°C.

Приобретаемая универсальная линия для изготовления выпуклых днищ с толщиной стенки до 60 мм позволит обеспечить обработку давлением холодным способом методом фланжирования за два этапа:

– первый этап: формовка купольной части днища из плоской заготовки на гидравлическом прессе в универсальном штампе;

– второй этап: загибка бортов днища с помощью универсальных гибочных роликов в ходе вращения заготовки днища вокруг своей оси на специализированной кромкогибочной (фланжировочной) машине до получения требуемого профиля: эллиптического, сферического, торосферического, плоского или конусного. В ходе обкатки бортов днища скорость вращения заготовки достигает 33 оборотов в минуту.

Основная номенклатура изделий, для которых планируется изготавливать днища – это различные корпуса сосудов под давлением диаметром от 2000 мм до 8000 мм для АЭУ и НГХ с толщиной стенки днищ от 15 до 60 мм. При использовании линии фланжирования возможно получить прирост экономического эффекта за счет сокращения трудоемкости процесса изготовления днищ. Это происходит благодаря автоматизированной и строго последовательной работе оборудования и как следствие – сокращению количества задействованных рабочих (термистов, операторов печи и др.).

Особое внимание стоит обратить на тот факт, что поставка прессы и кромкогибочной (фланжировочной) машины, входящих в состав рассматриваемой линии, должна быть осуществлена одним поставщиком. Это дает значительные преимущества по сравнению с приобретением оборудования по отдельности у разных производителей:

1. Прежде всего, это принцип поставки «из одних рук» – сокращение посредников и количества участвующих сторон, и как следствие высокая оперативность реагирования сервисных служб. Все работы по обслуживанию (при необходимости и гарантийная поддержка) осуществляется одной стороной.

2. Исключена ситуация, при которой каждая из сторон будет винить друг друга и это будет выливаться в большой временной простой (в случае поставки прессы, манипулятора и кромкогибочной машины разными компаниями).

3. Российская сервисная служба поставщика в период гарантии и по ее истечении должна будет за один приезд обслуживать все оборудование, входящее в состав линии. В случае если это будут 2 или 3 разные фирмы в послегарантийный период придется оплачивать такие приезды в двойном или тройном размере.

4. Не возникнет вопросов и сложностей сопряжения всех единиц оборудования в одну линию.

5. Контактным лицом по всем запросам, закупке расходных материалов и техническим консультациям будет одна сторона.

Линия, включающая в свой состав пресс универсальный тарельчатый для формирования купольной части днища и универсальную кромкогибочную машину (фланжировочную) для формирования бортов (рис. 3), будет эксплуатироваться в цехе №3. Ориентировочное место установки линии: корпус №1, пролет ПР, оси 100-120. В качестве альтернативы возможно размещение линии на осях МН 90-95.

Сведем предполагаемые затраты на приобретение и ввод в эксплуатацию линии фланжирования в таблице 5.



Рисунок 3. Линия фланжирования³
Figure 3. Flanging line³

Капитальные вложения в приобретение и ввод в эксплуатацию линии фланжирования по данным предприятия ориентировочно составят 472 млн. руб. Срок полезного использования данного дорогостоящего оборудования примем равным 15 годам. Сумма годовых амортизационных отчислений рассчитаем линейным методом по формуле (1):

$$A = \frac{C_{\text{оф}} \times k_{\text{л}}}{100\%}, \quad (1)$$

где A – сумма годовых амортизационных отчислений;

³ Атоммаш. – dzen.ru. – Режим доступа: <https://dzen.ru/a/YWalyzM3O16AsQ6K> (дата обращения: 18.11.2023).

$C_{\text{оф}}$ – стоимость оборудования;

k_n – норма амортизации.

Норма амортизации вычисляется по формуле (2):

$$k_n = \frac{1}{n} \times 100\% , \quad (2)$$

где n – срок полезного использования, лет.

$$k_n = \frac{1}{15} \times 100\% = 6,67\%$$

$$A = \frac{472715 \times 6,67\%}{100\%} = 31530 \text{ тыс.руб.}$$

Организация линии по фланжированию днищ заметно сокращает численность задействованных сотрудников: теперь высвободится как минимум некоторая часть кузнецов и термистов. В таблице 6 представлен ориентировочный расчет фонда оплаты труда по проектируемому мероприятию. Пример затраты труда оператора пресса ПН равными затратам труда оператора пресса на линии фланжирования.

Таблица 5. Калькуляция затрат на приобретение и ввод в эксплуатацию линии фланжирования [составлено авторами на основе данных внутренних документов предприятия]

Table 5. Calculation of costs for the purchase and commissioning of a flanging line [compiled by the authors on the basis of data from enterprise internal documents]

Статья калькуляции	Стоимость, тыс. руб.
Стоимость линии фланжирования (всего), в т.ч.:	472715,8
Затраты на приобретение пресса и кромкогибочной машины	372715,8
Разработка проектно-сметной документации на фундамент, включая инженерные изыскания	4000
Строительно-монтажные работы по обустройству места размещения и монтажу, в том числе устройство фундамента, подводка инженерных коммуникаций, монтаж оборудования (пресс, манипулятор, фланжировочная машина)	95000
Прочие затраты, в том числе командировочные расходы на завод изготовитель оборудования для проведения предварительной приемки и приемочно-сдаточные испытания после монтажа оборудования	1000

Таблица 6. Расчет трудозатрат на изготовление днищ СПП методом фланжирования [составлено авторами на основе данных внутренних документов предприятия]

Table 6. Calculation of labour costs to manufacture superheater separator bottoms by flanging method [compiled by the authors on the basis of data from enterprise internal documents]

Наименование операций	Трудоемкость*, н/ч	Расходы на оплату труда, руб.
Трудоемкость работ по сварке заготовки днища, (н/ч)	226	–
Трудоемкость на обработку давлением 1–го днища, (н/ч)	78	–
Трудоемкость работ по термической обработке днища (н/ч)	110	–
Трудоемкость прочих работ, нормо–часов (н/ч)	298	–
Общая трудоемкость на одно днище	712	–
Ориентировочные затраты на оплату труда (1 днище) при стоимости одного нормо-часа: 3 367,17 руб, руб.	–	2397425,04
Ориентировочные затраты на оплату труда (15 днищ), руб. без НДС	–	35961375,6
Взносы в Социальный фонд России (31,3%) – в расчете на 1 днище	–	750394,0375
Взносы в Социальный фонд России (31,3%) – в расчете на 15 днищ	–	11255910,56
Итого затрат на программу (15 единиц)	10680	47217286,16

Произведенные в таблице 7 расчеты показывают, что суммарные затраты на оплату труда рабочих, задействованных в изготовлении днищ СПП методом фланжирования, составят около 47 млн. руб. (в расчете на годовую программу тонкостенных днищ в количестве 15 единиц). Располагая информацией относительно всех элементов затрат предприятия на изготовление днищ методом холодной раскатки, сведем их в таблице 7, что позволит найти полную себестоимость. Обращаем внимание, что те расходы, которые совпадают по сравниваемым технологиям, мы не брали в расчет (затраты на материал для изготовления заготовки). Помимо этого, расходы на электроэнергию, потребляемую линией фланжирования и прессом ПН, также примем равными друг другу (получить бо-

лее точную информацию не представляется возможным).

Итак, расчеты, представленные в таблице 7, свидетельствуют о том, что затраты на изготовление одного днища при использовании технологии фланжирования, обойдутся предприятию в районе 10 млн. руб., на годовую программу, состоящую из 15 сборочных единиц, – 150,6 млн. руб.

Сравнивая совокупные затраты Филиала при применении двух описанных в статье технологий (на прессе ПН 229 млн. руб. на годовую программу и 150,6 млн. руб. на линии холодной раскатки на годовую программу), очевидно, что наиболее экономически выгодной технологией можно считать технологию изготовления тонкостенных днищ методом фланжирования.

Таблица 7. Калькуляция затрат на изготовление днищ методом фланжирования [составлено авторами на основе данных внутренних документов предприятия]

Table 7. Calculation of costs of bottoms production by flanging method [compiled by the authors on the basis of data from enterprise internal documents]

Статья калькуляции	Затраты на 1 днище, руб.	Затраты на годовую программу, руб.
Стоимость линии фланжирования	2102000	31530000
Фонд оплаты труда	2397425	35961375
Взносы в Социальный фонд России	750394,025	11255910,38
Накладные расходы (200% от ФОТ)	4794850	71922750
Итого	10044669,03	150670035,4

Заключение

Резюмируя, можно отметить, что машиностроительный комплекс играет важную роль в экономике Российской Федерации. Благодаря ему есть возможность обеспечить необходимой продукцией другие отрасли народного хозяйства, поэтому очень важным является внедрение новых технологий в деятельность машиностроительных предприятий. Особенно актуальным данный вопрос становится в настоящее время, когда многие зарубежные производители освободили рыночные ниши. На примере Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск можно увидеть действенность этих принципов. Благодаря освоению новой линии фланжирования завод обеспечит себе:

– выполнение собственных заказов по производству продукции для АЭУ, НГХ, емкостного и теплообменного оборудования в 2024-2026 гг. и на более долгосрочную перспективу;

– возможность осуществлять поставки тонкостенных крупногабаритных днищ для нужд Росатома и других предприятий;

– снижение трудоемкости изготовления тонкостенных днищ;

– отмену затрат на изготовление штамповой оснастки и на нагрев заготовок под нее;

– улучшит условия труда рабочих.

Все это дает основания полагать целесообразность и актуальность предлагаемого в исследовании мероприятия и позволяет сделать вывод о достижении поставленной цели – на основе анализа существующих технологий и способов производства продукции в Филиале АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск был предложен проект по освоению новых технологических мощностей, позволяющий улучшить технико-экономические показатели производственной деятельности предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Стадникова С.В. Совершенствование системы планирования производственных мощностей. *Актуальные проблемы экономического развития: Сборник докладов XI Международной заочной научно-практической конференции. Белгород, 01 сентября 2020 года.* Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. С. 358–362. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44149088&selid=44149347> (дата обращения: 05.12.2023).

Stadnikova S.V. Improvement of the production capacity planning system. *Actual problems of economic development: Collection of reports of the XI International Correspondence Scientific and Practical Conference. Belgorod, September 01-2020.* Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2020. pp. 358–362. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44149088&selid=44149347> (accessed: 05.12.2023).

2. Самигуллин И.Г. Инновационное развитие машиностроительного комплекса. *Научные труды Центра перспективных экономических исследований.* 2013;6:111–118. Режим доступа: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33952080> (дата обращения: 15.02.2024).

Samigullin I.G. Innovative development of the machine-building complex. *Scientific works of the Center for Advanced Economic Research.* 2013;6:111–118. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33952080> (accessed: 05.12.2023).

3. Савельева Е.В., Чернов В.Ю. Совершенствование технологического процесса металлообработки и повышение качества изготавливаемых деталей. *Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России.* 2015;1-1:104–106. Режим доступа: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34251964> (дата обращения: 05.12.2023).

Savelyeva E.V., Chernov V.Yu. Improving the technological process of metalworking and improving the quality of manufactured parts. *Engineering personnel are the future of Russia's innovative economy.* 2015;1-1:104–106. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34251964> (accessed: 05.12.2023).

4. Дорошенко Ю.А. Климашевская А.А. Технологическая модернизация предприятия как фактор повышения его конкурентоспособности. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2016;4:186–190. Режим доступа: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34227867> (дата обращения: 18.11.2023).

Doroshenko Yu.A. Klimashevskaya A.A. Technological modernization of an enterprise as a factor of increasing its competitiveness. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.* 2016;4:186–190. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34227867> (accessed: 18.11.2023).

5. Крылова И.Ю. Особенности организации производства и их влияние на формирование затрат продукции в машиностроении. *Экономическая наука – хозяйственной практике: Материалы сессий XIV Международной научно-практической конференции, Кострома, 06–07 сентября 2012 года.* Кострома: Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, 2012. С. 192–197. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22428319&selid=24951193> (дата обращения: 18.11.2023).

Krylova I.Y. Features of the organization of production and their impact on the formation of production costs in mechanical engineering. *Economic Science – Economic practice: Proceedings of the sessions of the XIV International Scientific and Practical Conference, Kostroma, 06-07 September 2012*. Kostroma: Kostroma State University named after N.A. Nekrasov, 2012. P. 192–197. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22428319&selid=24951193> (accessed: 18.11.2023).

6. Актуганова А.С., Ванюкова Р.А. Совершенствование порядка учета затрат на производство продукции на предприятиях отрасли машиностроения. *Решение*. 2019;1:216–218. Режим доступа: <http://www.uchetnirs.bf.pstu.ru/sait/conf2019/r-2019.pdf> (дата обращения: 05.12.2023).

Aktuganova A.S., Vanyukova R.A. Improving the accounting procedure for production costs at enterprises of the engineering industry. *Decision*. 2019;1:216–218. (In Russ.) Available at: <http://www.uchetnirs.bf.pstu.ru/sait/conf2019/r-2019.pdf> (accessed: 05.12.2023).

7. Золотарева Г.И., Язикова О.В. Методические особенности организации учета материальных затрат на предприятиях машиностроения. *Учет, анализ и аудит: проблемы теории и практики*. 2012;8:59–64. EDN TBHNSL. Режим доступа: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34039801> (дата обращения: 18.11.2023).

Zolotareva G.I., Yazikova O.V. Methodological features of the organization of accounting for material costs at machine-building enterprises. *Accounting, analysis and audit: problems of theory and practice*. 2012;8:59–64. EDN TBHNSL. Access mode: <https://elibrary.ru/contents.asp?id=34039801> (accessed: 18.11.2023).

8. Васильев А.В. Проблемы внедрения принципов бережливого производства на российских предприятиях энергетического машиностроения. *Бенефициар*. 2022;115:7–13. EDN NTZKIO. Режим доступа: <https://idpluton.ru/vypusk-115-nauchnogo-zhurnala-benefitsiar/> (дата обращения: 15.02.2024).

Vasiliev A.V. Problems of implementing the principles of lean manufacturing at Russian power engineering enterprises. *Beneficiary*. 2022;115:7–13. EDN NTZKIO. (In Russ.) Available at: <https://idpluton.ru/vypusk-115-nauchnogo-zhurnala-benefitsiar/> (accessed: 15.02.2024).

9. Вайцехович С.М., Власов Ю.В. Комплексная система оценки эффективности производства и потребления продукции машиностроения. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки*. 2020;2:146–167. Режим доступа: https://vestnik.pstu.ru/soc-eco/archives/?id=&folder_id=9436 (дата обращения: 15.02.2024).

Vaitsekhovich S.M., Vlasov Yu.V. A comprehensive system for evaluating the efficiency of production and consumption of mechanical engineering products. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Socio-economic sciences*. 2020;2:146–167. (In Russ.) Available at: https://vestnik.pstu.ru/soc-eco/archives/?id=&folder_id=9436 (accessed: 15.02.2024).

10. Грибова Е.И. Методика оценки влияния факторов производства на выпуск продукции в машиностроении. *Российский экономический интернет-журнал*. 2006;3:25. <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=3383230> (дата обращения: 18.11.2023).

Gribova E.I. Methodology for assessing the influence of production factors on output in mechanical engineering. *Russian economic online magazine*. 2006; 3:25. <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=3383230> (accessed: 18.11.2023)

ВКЛАД АВТОРОВ:

Попова Т.С. – концепция и качественная разработка исследования, написание текста статьи;

Карпова О.И. – Расчет затрат на изготовление днищ методом фланжирования (холодной раскатки) в Филиале АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск;

Попов А.А. – Расчет затрат на изготовление днищ методом горячей штамповки в Филиале АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск;

Пахорукوف А.Д. – изучение теоретических источников по проблематике изучаемой проблемы для формирования методического аппарата анализа и оценки предметной области исследования.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Попова Татьяна Сергеевна, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

e-mail: TSPopova@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Popova T.S. – the concept and qualitative development of the study, writing the text of the article;

Karpova O.I. – Calculation of costs for the manufacture of bottoms by flanking (cold rolling) in the «Atomash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonk;

Popov A.A. – Calculation of costs for the manufacture of bottoms by hot stamping in the «Atomash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonk;

Pakhorukov A.D. – the study of theoretical sources on the problems of the studied problem for the formation of a methodological apparatus for the analysis and evaluation of the subject area of research.

FUNDING:

The study had no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Tatyana S. Popova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Economics and Socio-Humanitarian Disciplines, Volgodonk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-2672>

e-mail: TSPopova@mephi.ru

Ольга Игоревна Карпова, ведущий инженер-технолог по металлургии Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: karpova_oi@atommash.ru

Андрей Александрович Попов, ведущий специалист по инвестиционному развитию Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atommash.ru

Алексей Дмитриевич Пахорук, студент направления подготовки «Экономика», Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8805-8596>

e-mail: leha.pakhorukov.01@mail.ru

Olga I. Karpova, Leading Metallurgical Engineer, the «Atommash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: karpova_oi@atommash.ru

Andrey A. Popov, Leading Specialist of Investment Development, the «Atommash» the branch of «AEM-Technologies» JSC in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2828-0410>

e-mail: popov_aa@atommash.ru

Alexey D. Pakhorukov, Student of Economics Department, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov Region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8805-8596>

e-mail: leha.pakhorukov.01@mail.ru

Поступила в редакцию 08.12.2023

После доработки 12.03.2024

Принята к публикации 14.03.2024

Received 08.12.2023

Revision 12.03.2024

Accepted 14.03.2024

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Акобян М.Т.	93
Байдаров Д.Ю.	58
Бекетов В.Г.	43
Богале М.А.	37
Бойкова Т.В.	58
Бондаренко В.А.	101
Бураева Е.А.	22
Гетман А.Ф.	68
Елохин А.П.	5
Камышев А.В.	68
Карпова О.И.	111
Коновалова Л.А.	37
Кочнов Ю.О.	58
Кравец С.Б.	52
Ксенофонтов А.И.	93
Куделя С.А.	17
Кузин С.А.	52
Кузьмин Д.А.	68
Кузьмичевский А.Ю.	68
Маджидов А.И.	5
Мальшевский В.С.	17
Мельников И.В.	43
Нечитайлов В.В.	43
Пасманик Л.А.	68
Пахоруков А.Д.	111
Плахотняя Д.П.	22
Попов А.А.	111
Попова И.Ю.	43
Попова Т.С.	111
Потапов В.В.	68
Пржедецкая Н.В.	101
Проскуряков К.Н.	29
Ратушный В.И.	22
Рахман А.С.К.	76
Ровинский В.Д.	68
Рябов А.О.	85
Саргсян С.А.	93
Сафронова Н.Н.	58
Смолин А.Ю.	52
Снитко Н.А.	43
Тутнов И.А.	58
Увакин М.А.	76
Улин С.Е.	5
Умаров Ш.Б.	93
Фомин Г.В.	17
Хвостова М.С.	29
Хоссен М.М.	76
Цуверкалова О.Ф.	85
Шилин А.Н.	37
Шустов А.Е.	5

AUTHOR INDEX

Baidarov D. Yu.	58
Beketov V. G.	43
Bogale M. A.	37
Bondarenko V. A.	101
Boykova T. V.	58
Buraeva E. A.	22
Elokhin A. P.	5
Fomin G. V.	17
Getman A. F.	68
Hakobyan M. T.	93
Hossen M. M.	76
Kamyshev A. V.	68
Karpova O. I.	111
Khvostova M. S.	29
Kochnov Yu. O.	58
Konovalova L. A.	37
Kravets S. B.	52
Ksenofontov A. I.	93
Kudelya S. A.	17
Kuzin S. A.	52
Kuzmichevskiy A. Yu.	68
Kuzmin D. A.	68
Majidov A. I.	5
Malyshevsky V. S.	17
Melnikov I. V.	43
Nechitailov V. V.	43
Pakharukov A. D.	111
Pasmanik L. A.	68
Plahotnyaya D. P.	22
Popov A. A.	111
Popova I. Yu.	43
Popova T. S.	111
Potapov V. V.	68
Proskuryakov K. N.	29
Przhedetskaya N. V.	101
Rahman A. S. K.	76
Ratushnyj V. I.	22
Rovinskiy V. D.	68
Ryabov A. O.	85
Safronova N. N.	58
Sargsyan S. A.	93
Shustov A. E.	5
Shilin A. N.	37
Smolin A. Yu.	52
Snitko N. A.	43
Tsuverkalova O. F.	85
Tutnov I. A.	58
Ulin S. E.	5
Umarov Sh. B.	93
Uvakin M. A.	76

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 упоминаются 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
