НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2023, Том 13, № 2 (47)

Журнал основан в ноябре 2011 г.
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 10647
Выходит 4 раза в год, ISSN 2305-414X
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г.
Журнал включен в перечень ВАК РФ (980)
Группы научных специальностей:
1.2 Компьютерные науки и информатика
2.2 Электроника, фотоника, приборостроение и связь
2.4 Энергетика и электротехника
5.2 Экономика

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

Главный редактор:
М.Н. Стриханов, доктор физико-математических наук, профессор, Российская Федерация

Заместитель главного редактора:
В.А. Руденко, доктор соц. наук, профессор, Российская Федерация

Редакционная коллегия:
В.П. Поваров, доктор техн. наук, Российская Федерация
М.К. Скаков, доктор физ.-мат. наук, Казахстан
В.Е. Шукшунов, доктор техн. наук, Российская Федерация
Лю Дамин, доктор техн. наук, Китай
А.В. Чернов, доктор техн. наук, Российская Федерация
А.П. Елохин, доктор техн. наук, Российская Федерация
Ю.И. Пимшин, доктор техн. наук, Российская Федерация
Абдель-Монем Мохамед Эл-Батахи, д-р техн. наук, Египет
В.В. Кривин, доктор техн. наук, Российская Федерация
В.И. Ратушный, доктор физ.-мат. наук, Российская Федерация
А.А. Сальников, канд. техн. наук, Российская Федерация
А.А. Лапкис, канд. техн. наук, Российская Федерация
С.Э. Гоок, PhD в области технических наук, Германия
М.В. Головко, доктор экон. наук, Российская Федерация
Н.М. Фоменко, доктор экон. наук, Российская Федерация
А.Н. Шилин, доктор техн. наук, Российская Федерация

Учредитель:
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.
Выход в свет 21.06.2023 г.
Формат 84 х 108/16. Объем 8,07 печ. л.
Гарнитура «TimesNewRoman»,
Тираж 300 экз.
Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ
Цена свободная

Москва

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2023, Том 13, № 2 (47)

Founded in November, 2011
The subscription index is 10647 in the catalogue «Press of Russia»
Quarterly
ISSN 2305-414X, reg. № FS77-47155, November, 3 2011

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

Editor-in-Chief:
M.N. Strikhanov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Prof., Russian Federation

Deputy Editor-in-Chief:
V.A. Rudenko, Dr. Sci. (Soc.), Prof., Russian Federation

Editorial Staff:
V.P. Povarov, Dr. Sci. (Eng.), Russian Federation
M.K. Skakov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Kazakhstan
V.E. Shukshunov, Dr. Sci. (Eng.), Russian Federation
Liu Daming, Dr. Sci. (Eng.), China
A.V. Chernov, Dr. Sci. (Eng.), Russian Federation
A.P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Russian Federation
Y.I. Pimshin, Dr. Sci. (Eng.), Russian Federation
Abdel-Monem Mohamed EI-Batahy, Dr. Sci. (Eng.), Egypt
V.V. Krivin, Dr. Sci. (Eng.), Russian Federation
V.I. Ratushny, Dr. Sci (Phys. and Math.), Russian Federation
A.A. Salnikov, Cand. Sci. (Eng.), Russian Federation
A.A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), Russian Federation
S.E. Gook, PhD (Eng.), Germany
M.V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), Russian Federation
N.M. Fomenko, Dr. Sci. (Econ.), Russian Federation
A.N. Shilin, Dr. Sci. (Eng.), Russian Federation

Founder:
National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address: Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation
Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russian Federation
telephone: (8639)222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru
Press address: Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russian Federation

Computer layout Kazak Yu.Yu.
Published on 21.06.2023
The format is 84 x 108/16. Volume 8,07 printed sheets
Headset "TimesNewRoman",
The circulation is 300 copies
Printed in the VITI (f) printing house of the MEPhI Research Institute
The price is free

Moscow

© National Research Nuclear University MEPhI, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

2023, № 2(47)

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Особенности применения гарантий при перегрузке отработавшего ядерного топлива на оптимизированном плавучем энергоблоке
С.А. Душев, И.В. Шмелев, П.А. Горбунов, Н.А. Сальникова, А.Д. Абросимов, В.В. Мальев, Т.А. Тагирова 6

Совершенствование методов альголизации и биомелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС и приплотинной части Цимлянского водохранилища
О.И. Горская 14

Предиктивная диагностика расходомеров реактора РБМК
А.М. Загребаев, Е.О. Попов 24

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Исследование критериев устойчивости дугового разряда на предельном режиме сварки покрытыми электродами
С.М. Бурдаков, О.Ф. Цуверкалова, Ю.В. Заяров, Л.В. Постой, В.Г. Ткачев 31

Представление результатов электрического контроля методом электрофизической хроматографии
В.И. Сурин, А.С. Щербань, А.А. Щербаков, М.Е. Жидков, С.А.Томилин, М.Б. Иваний, А.В. Козлов 39

Прогнозирование результатов испытаний по определению коэффициента гидравлического сопротивления клапана обратного осесимметричного
С.А. Кузин, С.Б. Кравец 50

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Входные данные для согласования состояний модели и прототипа АЭС с ВВЭР
И.А. Молев, Д.А. Соловьёв, А.Л. Лобарев, Д.А. Плотников, Х.А. Танаш, Е.В. Чернов 57

Возможность продления кампании действующих энергоблоков ВВЭР-1000 за счет работы на скользящем давлении второго контура
А.С. Грачёв, А.А. Лапкис, А.Ю. Смолин 66

Диагностика привода системы управления и защиты реакторной установки
Е.А. Абидова, П.В. Поваров, В.М. Попов, О.Ю. Пугачева, В.Я. Шпицер 79

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

Применение риск-ориентированного подхода при подготовке к выполнению переключений на Нововоронежской АЭС
А.А. Мозговой, И.С. Рукин, А.В. Лебедева 88

Модель оценки экономической эффективности внедрения ПСР-проектов модернизации оборудования АЭС
И.А. Ухалина, М.В. Головко, С.П. Агапова, А.В. Анцибор, Н.А. Ефименко, Ж.С. Рогачева 97

Авторский указатель номера 2(47), 2023 106

CONTENTS

2023, № 2(47)

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

Features of applying safeguards to Optimized Floating Power Unit spent nuclear fuel handling
S.A. Dushev, I.V. Shmelev, P.A. Gorbunov, N.A. Salnikova, A.D. Abrosimov, V.V. Malev, T.A. Tagirova 6

Improvement of methods of algolization and biomelioration of the Rostov NPP cooling pond and the near dam part of the Tsimlyansk reservoir
O.Yu. Gorskaya 14

Predictive diagnostics of RBMK reactor flowmeters
A.M. Zagrebaev, E.O. Popov 24

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

Arc stability study at the limit mode of welding with coated electrodes
S.M. Burdakov, O.F. Tsuverkalova, Yu.V. Zayarov, L.V. Postoy, V.G. Tkachev 31

Presentation of electrical control results by electrophysical chromatography method
V.I. Surin, A.S. Shcherban, A.A. Shcherbakov, M.E. Zhidkov, S.A. Tomilin, M.B. Ivanyi, A.V. Kozlov 39

Prediction of test results to determine the hydraulic resistance coefficient of an axially symmetrical check valve
S.A. Kuzin, S.B. Kravets 50

OPERATION OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

Input data to match model and prototype states of WWER NPP
I.A. Molev, D.A. Solovyev, A.L. Lobarev, D.A. Plotnikov, H.A. Tahash, E.V. Chernov 57

Potential and possibility of extending the campaign to increase VVER-1000 power units on sliding distribution of the secondary circuit
A.S. Grachev, A.A. Lapkis, A.Yu. Smolin 66

Diagnostics of the drive of the control and protection system of the reactor plant ark type
E.A. Abidova, P.V. Povarov, V.M. Popov, O.Yu. Pugacheva, V.Ya. Shpicer 79

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

Application of risk-based approach in switching operations preparation at Novovoronezh NPP
A.A. Mozgovoj, I.S. Rukin, A.V. Lebedeva 88

A model of assessing the economic efficiency of introducing Rosatom Production System projects to upgrade the NPP equipment
I.A. Ukhalina, M.V. Golovko, S.P. Agapova, A.V. Antsibor, N.A. Efimenko, Zh.S. Rogacheva 97

Author Index of 2(47), 2023 106

Уважаемые читатели!

2023 год – юбилейный для Волгодонского инженерно-технического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

45 лет назад в г. Волгодонске был создан вуз, призванный обеспечить квалифицированными кадрами крупнейший для того времени в стране завод тяжелого машиностроения «Атоммаш», который тогда уже приступил к производственному процессу по изготовлению оборудования для АЭС. В 1978 г. был дан старт рождению инженерного образования в г. Волгодонске. Необходимость в кадровом обеспечении завода способствовала динамичному развитию института.

В 2000-х годах, в связи с завершением строительства и сдачей в промышленную эксплуатацию первого блока Ростовской АЭС, Волгодонск становится атомградом, и начинается новый этап в жизни и развитии первого Волгодонского вуза. В 2009 г. принимается решение о переводе института в структуру ядерного университета МИФИ.

Как показало время, это было стратегически верное решение, поскольку вуз находится в непосредственной близости с предприятиями четырех дивизионов Госкорпорации «Росатом», и потребность в квалифицированных кадрах для этих предприятий обеспечивает именно профильный ядерный институт – ВИТИ НИЯУ МИФИ!

Особенность ВИТИ НИЯУ МИФИ в том, что это единственный в Южном федеральном округе вуз, который находится в городе расположения РоАЭС, завода по производству оборудования для атомных станций «Атоммаш» и других предприятий, обеспечивающих реализацию и сопровождение всех производственных циклов атомной станции. Это дает уникальную возможность поддерживать тесную связь с работодателем, привлекать к учебному процессу специалистов-практиков, обеспечивать студентам вуза места для прохождения практического обучения и возможность вместе с дипломом об окончании вуза выдавать приглашения на работу.

На сегодняшний день в составе Волгодонского инженерно-технического института – 3 факультета, 10 кафедр (в том числе 2 базовых), техникум, научно-исследовательский институт атомного энергетического машиностроения, который является центром внедрения современных технологий, методов и средств диагностики ядерных энергетических объектов.

Ежегодно в стенах вуза проводится Международная научная конференция «Безопасность ядерной энергетики». С 2011 года издается научный журнал, включенный в перечень ВАК.

Поздравляю всех, кто причастен к созданию и развитию первого вуза г. Волгодонска – флагмана атомного образования Юга России. Благодаря Вам ВИТИ НИЯУ МИФИ считается одним из лучших в донском регионе по подготовке кадров для атомной отрасли, призванной стать локомотивом российской промышленности и драйвером технологического суверенитета и национальной безопасности России.

Руководитель ВИТИ НИЯУ МИФИ,
депутат Законодательного Собрания
Ростовской области В.А. Руденко

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

УДК 621.039.577: 341.29
DOI 10.26583/gns-2023-02-01
EDN MAEBCO

Особенности применения гарантий при перегрузке отработавшего ядерного топлива на оптимизированном плавучем энергоблоке

С.А. Душев, И.В. Шмелев, П.А. Горбунов, Н.А. Сальникова, А.Д. Абросимов, В.В. Мальев, Т.А. Тагирова ✉
АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Россия
✉ *tagirova.t@okbm.nnov.ru*

Аннотация. После успешного ввода в эксплуатацию плавучего энергоблока «Академик Ломоносов» с реакторной установкой КЛТ-40С следующим шагом Госкорпорации «Росатом» стала разработка оптимизированных плавучих энергоблоков (ОПЭБ). ОПЭБ с реакторной установкой серии РИТМ является экспортоориентированным продуктом и предназначен для эксплуатации на зарубежных площадках. Технические решения ОПЭБ основаны на практическом опыте проектирования и эксплуатации атомных ледоколов и решении задач по обеспечению безопасности эксплуатации ядерных энергетических установок в суровых условиях Севера. Период между перегрузками ОПЭБ может составлять до 10 лет в зависимости от мощности, на которой эксплуатируется реакторная установка, при обогащении ядерного топлива менее 20%. Технология перегрузки реакторов серии РИТМ обладает рядом особенностей по сравнению с технологией перегрузки других атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами. Установки типа РИТМ никогда не ставились под гарантии МАГАТЭ; возможности и особенности применения гарантий МАГАТЭ к таким установкам требуют дополнительного анализа. Разработанная модель эксплуатации предполагает, что ОПЭБ будет эксплуатироваться на площадке размещения в течение длительного периода, а все операции по обращению с топливом будут осуществляться на специализированном предприятии в РФ. В рамках данной статьи будут рассмотрены основные особенности обращения с топливом в жизненном цикле ОПЭБ на базе РУ РИТМ-200М, важные с точки зрения гарантий МАГАТЭ, и представлено видение разработчиков в отношении решения ключевых задач в области нераспространения путем адаптации подходов к осуществлению гарантий МАГАТЭ с учетом технических особенностей ОПЭБ.

Ключевые слова: оптимизированный плавучий энергоблок (ОПЭБ), гарантии МАГАТЭ, перегрузка отработавшего ядерного топлива, концепция обращения с ядерным топливом на ОПЭБ, РУ РИТМ-200М.

Для цитирования: Душев С.А., Шмелев И.В., Горбунов П.А., Сальникова Н.А., Абросимов А.Д., Мальев В.В., Тагирова Т.А. Особенности применения гарантий при перегрузке отработавшего ядерного топлива на оптимизированном плавучем энергоблоке. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):6–14. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-01

Features of applying safeguards to Optimized Floating Power Unit spent nuclear fuel handling

Sergei A. Dushev, Igor V. Shmelev, Pavel A. Gorbunov, Nadezhda A. Salnikova, Aleksey D. Abrosimov, Vladimir V. Malev, Tatyana A. Tagirova ✉
Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation
✉ *tagirova.t@okbm.nnov.ru*

Abstract. After the Floating Power Unit Akademik Lomonosov with the KLT-40S reactor plant had been successfully commissioned, the next step for ROSATOM was to develop optimized floating power units (OFPU). OFPUs powered by the RITM reactor plant are an export-oriented product, and they designed to operate on sites outside Russia. OFPU engineering solutions are based upon the practical design and operation experience in nuclear-powered icebreakers and upon problem solving to assure safety for operation of nuclear plants under severe northern conditions. At the nuclear fuel enrichment lower than 20%, the refueling interval

© Душев С.А., Шмелев И.В., Горбунов П.А. и др., 2023

for the OFPU may be up to 10 years depending on Loadings. The RITM reactor refueling process has a number of differences compared to the refueling process of other nuclear power plants fitted with water-cooled water-moderated power reactors. RITM plants have never been placed under the IAEA Safeguards, and capabilities and features of applying the IAEA Safeguards to such plants require an additional analysis. The developed operation model assumes that the OFPU be operated on a deployment site for a long period, and all fuel handling operations will be done at a specialized facility in the Russian Federation (RF). This paper is discussing the major fuel handling features in the life cycle of the OFPU fitted with RITM-200M—these are the critical features in terms of the IAEA Safeguards. Also, the paper is providing the designers' perspective on solving the key non-proliferation problems through adapting the Safeguards approaches with account of the OFPU technical features.

Keywords: the optimized floating power unit (OFPU), IAEA Safeguards, spent fuel handling, OFPU fuel handling concept, the RITM-200M reactor plant.

For citation: Dushev S.A., Shmelev I.V., Gorbunov P.A., Salnikova N.A., Abrosimov A.D., Malev V.V., Tagirova T.A. Features of applying safeguards to optimized floating power unit spent nuclear fuel handling. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):6-14 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-01

Введение

В настоящее время в мире наблюдается устойчивый интерес к атомным станциям малой мощности ввиду их способности удовлетворять потребность в энергообеспечении пользователей, удаленных от центральных энергосетей. После успешного ввода в эксплуатацию плавучего энергоблока «Академик Ломоносов» с реакторной установкой (далее – РУ) КЛТ-40С организациями Госкорпорации «Росатом» был разработан эскизный проект оптимизированного плавучего энергоблока с РУ РИТМ-200М (далее – ОПЭБ). Проектирование ОПЭБ осуществлялось с учетом возможности его эксплуатации за рубежом, в том числе, в странах, которые относятся к числу государств, не обладающих ядерным оружием, согласно терминологии Договора о нераспространении ядерного оружия [1]. Согласно Договору о нераспространении ядерного оружия РФ относится к государствам, обладающим ядерным оружием, и ставить под гарантии свои объекты использования атомной энергии не обязана, что регулируется соответствующим соглашением с МАГАТЭ (INFCIRC/327, INFCIRC/327/Add.1.) [2]. Однако при перемещении ОПЭБ на площадку эксплуатации в государство, не обладающее ядерным оружием, такое государство будет обязано поставить ОПЭБ под гарантии МАГАТЭ. Права и обязанности МАГАТЭ, государства-импортера и государства-поставщика зафиксированы в типовых Соглашениях INFCIRC/153 (статьи 92-96) «Структура и содержание Соглашений между Агентством и государствами, требуемых для связи с Договором о нераспространении ядерного оружия» [3], Соглашении INFCIRC/327 (статья 89) «Дополнительный протокол между РФ и МАГАТЭ к Соглашению между СССР и МАГАТЭ о применении гарантий в СССР» и документе INFCIRC/207 «Уведомление Агентства об экспорте и импорте ядерного материала» [4]. Данные документы устанавливают требования по информированию МАГАТЭ о международных передачах ядерного материала, а также регламентируют порядок проверки инспекторами МАГАТЭ ядерного материала.

Принимающее государство должно будет предоставить МАГАТЭ информацию о ядерном материале и установке как можно раньше [4] после принятия решения о размещении ОПЭБ на своей территории. Используя информацию о конструкции, схеме установки, форме, количестве, нахождении и движении ядерного материала, МАГАТЭ разрабатывает уникальный подход к применению гарантий с учетом характеристик объекта.

В отличие от подходов к постановке под гарантии водо-водяных реакторов большой мощности, в области атомных станций малой мощности отсутствует достаточный опыт применения гарантий МАГАТЭ, позволяющий использовать типовые подходы. Для адаптации существующих подходов и процедур МАГАТЭ потребуется изучение конструктивных особенностей ОПЭБ и алгоритмов обращения с

ядерным материалом на его борту. При этом необходимо учитывать, что технические решения ОПЭБ и предлагаемая модель эксплуатации исключают проведение операций по обращению с топливом на площадке размещения.

Описание ОПЭБ и модель эксплуатации

ОПЭБ представляет собой несамоходное судно с двумя РУ на борту (рис. 1) общей электрической мощностью 100 МВт (нетто). Размещение РУ в ограниченном пространстве требует применения технических решений, обеспечивающих не только безопасность эксплуатации, но также компактность оборудования. По сравнению с ПЭБ «Академик Ломоносов» водоизмещение ОПЭБ уменьшено на 4320 тонн, в том числе, благодаря использованию РУ РИТМ-200М.

Рисунок 1. Оптимизированный плавучий энергоблок (ОПЭБ)
Figure 1. Optimized Floating Power Unit (OFPU)

Реакторные установки серии РИТМ – это разработка АО «ОКБМ Африкантов». В настоящее время РУ этой же серии установлены на универсальных атомных ледоколах «Арктика», «Сибирь», «Урал». Первые два уже введены в эксплуатацию и входят в состав ледокольного флота РФ. Строящиеся по аналогичному проекту ледоколы «Якутия» и «Чукотка» также будут оснащены РУ серии РИТМ. На рисунке 2 представлена операция погрузки РУ РИТМ-200 для головного атомного ледокола «Арктика». Использование на борту ОПЭБ РУ РИТМ-200М позволяет увеличить электрический выход на 40% по сравнению с РУ КЛТ-40С, при этом габариты РУ РИТМ-200М приблизительно на 45% меньше [5]. Каждая РУ размещается в своей защитной оболочке, которая служит надёжным барьером к распространению радиоактивных продуктов в окружающую среду и обеспечивает безопасность персонала. Особенностью российских проектов плавучих энергоблоков является наличие защитной оболочки, выполненной из бетона. Целостность защитной оболочки обеспечивается предохранительным клапаном сброса избыточного давления, системой охлаждения защитной оболочки и рекомбинаторами водорода. [6].

Рисунок 2. Погрузка РУ РИТМ-200 для головного атомного ледокола «Арктика»
Figure 2. Loading the RITM-200 reactor plant for the lead nuclear-powered icebreaker «Arktika»

В проекте РУ РИТМ-200М используется активная зона кассетного типа с металлокерамическим топливом. Топливо содержится в форме частиц, размещенных в матрице из алюминиевого сплава, что обеспечивает высокую теплопроводность. Обогащение ядерного топлива составляет менее 20%, длительность топливной кампании в зависимости от коэффициента использования установленной мощности при эксплуатации составляет до 10 лет.

В заводских условиях плавучий энергоблок изготавливается до стадии полной готовности к эксплуатации. На специализированном предприятии осуществляется загрузка топлива, проводятся комплексные швартовные испытания, и осуществляется физпуск реакторной установки. Это позволяет минимизировать объём строительно-монтажных работ на площадке размещения. ОПЭБ является несамоходным судном, поэтому к месту эксплуатации его доставляют на борту судна-дока либо, на небольшие расстояния, с помощью буксировки. На площадке размещения ОПЭБ обеспечивается жесткое крепление ОПЭБ к береговым гидротехническим сооружениям, которые обеспечивают безопасность эксплуатации и передачу электроэнергии на берег. На площадке размещения обеспечивается ежегодное профилактическое обслуживание оборудования, при этом никакие операции с топливом на площадке размещения производиться не будут. После окончания назначенного периода эксплуатации, который определяется исходя из потребностей заказчика, производится остановка РУ, после чего ОПЭБ транспортируется на специализированное предприятие в РФ, где производится перегрузка топлива.

Назначенный срок службы ОПЭБ составляет 60 лет с ежегодным профилактическим обслуживанием, заводским ремонтом с периодичностью до 10 лет и капитальным ремонтом через 20 лет эксплуатации. Модель эксплуатации предполагает, что заводской ремонт ОПЭБ будет совмещен по времени проведения с перегрузкой ядерного топлива.

Концепция обращения с ядерным топливом

Корпус ОПЭБ достаточно компактный по сравнению с плавучим энергоблоком «Академик Ломоносов», и на борту ОПЭБ отсутствуют хранилище свежего ядерного топлива, хранилище отработавшего ядерного топлива, перегрузочное и грузоподъемное оборудование, без которого невозможно вскрыть ядерный реактор. Отсутствие перегрузочного оборудования и ограниченное количество помещений, необходимых для обращения с ядерным материалом, важно с точки зрения применения подходов к осуществлению гарантий МАГАТЭ.

Конструктивные особенности РУ РИТМ-200М исключают возможность перегрузки топлива под водой с применением машины перегрузочной, и в проекте ОПЭБ используется технология выгрузки топлива из реактора с помощью перегрузочного контейнера. Аналогичная технология выгрузки отработавшего ядерного топлива применяется на плавучем энергоблоке «Академик Ломоносов», а также при перезарядке атомных ледоколов.

Безопасность перегрузки обеспечивается, в том числе, за счет выбора конструкционных материалов и оптимальных толщин конструкций оборудования для выполнения требований по защите персонала от излучения, а также использования свойств внутренней самозащищенности контейнера с необходимыми запасами воды и наличием средств для оперативного восполнения её запасов. Уровень безопасности данной технологии в целом соответствует положениям документа SSG-63 Design of Fuel Handling and Storage Systems for Nuclear Power Plants [7].

Загрузка ядерного топлива в реактор реализуется по следующей схеме. Свежее топливо с соответствующей сопроводительной документацией доставляется на место обслуживания ОПЭБ. Для его загрузки в реактор принимают соответствующие меры безопасности, которые не предусматривают хранение ядерного топлива на борту

ОПЭБ, а регламентируют загрузку в реактор сразу. Топливо перегружается в пенал, который представляет собой негерметичную корзину для перемещения новых тепловыделяющих сборок в зону загрузки ядерного топлива в реактор. После загрузки полной активной зоны реакторы ОПЭБ герметизируются и опечатываются. С этого момента без использования специального оборудования доступ к ядерному топливу исключен.

По завершению загрузки топлива ОПЭБ отправляется на место эксплуатации. По завершению топливной кампании ОПЭБ транспортируется обратно на специализированное предприятие в РФ, где осуществляется перегрузка.

Перегрузка активных зон реализовывается после остановки реакторной установки, полного или частичного её расхолаживания и сброса давления первого контура до атмосферного. Работы по перегрузке активных зон должны выполняться с использованием перегрузочного комплекса и необходимой инфраструктуры. На специализированном предприятии производятся операции по демонтажу крышки реактора, выгрузке отработавшего ядерного топлива из реакторной установки и загрузке свежего топлива в реакторы.

Проведение каких-либо операций с топливом или с открытым реактором в стране размещения не предусмотрено. Для получения доступа к ядерному материалу необходимо специальное оборудование и грузоподъемные средства, которые позволят демонтировать крышку реактора и часть внутрикорпусных устройств для извлечения ядерного топлива. Указанное оборудование является высокотехнологичным и требует специальных знаний о конструкции реакторной установки и активной зоны, обладает большими габаритами и не может быть незаметно размещено внутри ОПЭБ. Размещение требуемого оборудования рядом с ОПЭБ на площадке эксплуатации может быть выявлено с помощью спутниковых снимков.

Подходы к применению гарантий МАГАТЭ при эксплуатации ОПЭБ

МАГАТЭ каждый год [8] формирует уникальный план к применению гарантий и обеспечению режима нераспространения с учетом характеристик объекта. МАГАТЭ также определяет виды проверок, которые будут проведены в отношении конкретного объекта. В частности, МАГАТЭ может осуществлять проверку фактически наличного количества ядерного материала, информации о конструкции, схеме установки, форме и так далее. Так называемые полевые проверки [8] включают в себя как непосредственное взаимодействие с ядерным материалом, так и проверку документации. В частности, оценивается фактически наличное количество ядерного материала – это сумма всех измеренных или выведенных оценок количеств ядерного материала в партии, фактически имеющихся в наличии в данное время в зоне баланса материала, полученных в соответствии с согласованными процедурами [9]. В проекте ОПЭБ зона баланса материалов может быть определена в пределах отсека с реакторными установками, так как это единственное помещение на борту ОПЭБ, где может находиться ядерный материал. Соответственно все проверки со стороны МАГАТЭ целесообразно проводить только в этом отсеке.

С технической точки зрения в период эксплуатации ОПЭБ на площадке размещения в стране-заказчике предусмотренная процедурами МАГАТЭ проверка фактически наличного количества ядерного материала может проводиться ежегодно. Однако эффективность и целесообразность этой проверки будет минимальной, так как все процедуры, проводимые сотрудниками МАГАТЭ, сведутся к проверке документации по ядерному материалу. В этот период информация, представленная в документации, не может быть верифицирована с помощью проверки фактического наличного количества ввиду отсутствия доступа к ядерному материалу.

С точки зрения применения гарантий МАГАТЭ и обеспечения режима нераспространения на месте эксплуатации ОПЭБ единственной эффективной

процедурой представляется контроль отсутствия несанкционированного доступа в реактор, а также внутрь ОПЭБ через люковые закрытия аппаратной извне. Эта задача может быть решена с помощью обоснованного применения оборудования мер сохранения и наблюдения. Такое оборудование выступает гарантом отсутствия несанкционированного доступа к ядерному материалу и позволяет подтвердить, что в период между перегрузками топлива никаких несанкционированных операций с ядерным материалом не совершалось. Представляется целесообразным использование камер видеонаблюдения и пломб, фиксирующих открытие люковых закрытий аппаратной и крышки реактора. Ключевой задачей инспекторов МАГАТЭ в ходе очных инспекций будет подтверждение целостности пломб и камер, чтобы подтвердить отсутствие вмешательства, которое могло привести к изменению показаний.

Также может быть оценена возможность дистанционного контроля показаний оборудования мер сохранения и наблюдения, что позволит снизить финансовые затраты на проведение очных проверок инспекторами МАГАТЭ.

В связи с тем, что оборудование мер сохранения и наблюдения не должно мешать нормальной эксплуатации ОПЭБ, разработчику проекта ОПЭБ необходимо предусмотреть возможность размещения этого оборудования на этапе проектирования.

Подход к применению гарантий МАГАТЭ при загрузке и перегрузке ОПЭБ

В период загрузки ядерного топлива в реакторы ОПЭБ имеется возможность проводить проверку фактически наличного количества ядерного материала. Такая процедура потребует очного присутствия инспекторов МАГАТЭ и может быть организована на основе специальных договоренностей.

В пределах зоны баланса материалов проверки в отношении ядерного материала на борту ОПЭБ могут быть осуществлены в четырех ключевых точках измерения, на вход и на выход ядерного материала в помещение каждой из двух реакторных установок. Ключевая точка измерения движения ядерного материала и ключевая точка измерения для определения инвентарного количества ядерного материала могут находиться поблизости от входного люка на ОПЭБ и в помещении реакторной установки. Схематичное изображение размещения ключевых точек измерения представлено на рисунке 3.

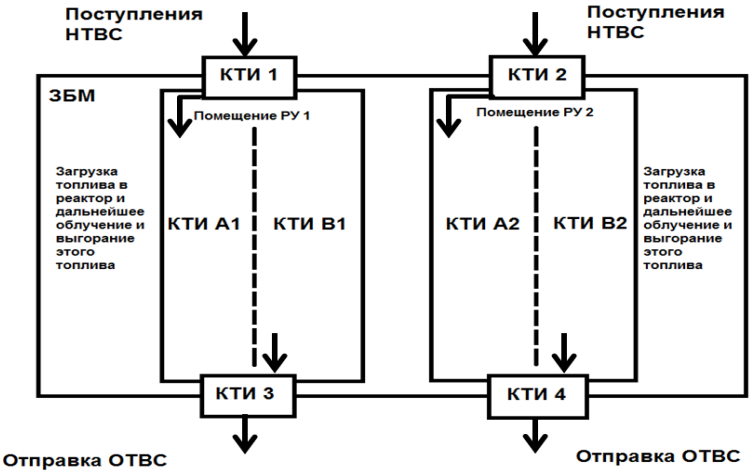


Рисунок 3. Ключевые точки измерения на борту ОПЭБ
Figure 3. Key measurement points (KMPs) on board the OFPU

В рамках проверки по контролю движения ядерного материала на борту ОПЭБ сотрудники МАГАТЭ могут осуществить сверку заводских номеров свежих тепловыделяющих сборок с заявленными в документации номерами. Также они могут определить вес тепловыделяющих сборок и сверить его с заводскими показателями. Также может осуществляться проверка даты выгрузки (отправки) по журналу.

При выгрузке отработавшего ядерного топлива может осуществляться только проверка учетной документации. Процедуры по отношению к определению выгорания, ядерных потерь общего количества и количества делящегося изотопа урана, а также ядерного производства плутония и другие процедуры в отношении отработавшего ядерного топлива на борту ОПЭБ не являются релевантными, так как отработавшее ядерное топливо извлекается из реакторной установки на территории РФ, не хранится на борту ОПЭБ и сразу покидает пределы судна. Соответственно, у страны размещения отсутствуют обязательства по постановке под гарантии МАГАТЭ в отношении отработавшего ядерного топлива. Дальнейшее обращение с отработавшим ядерным топливом осуществляется в РФ.

При этом необходимо отметить, что, если данные оборудования мер сохранения и наблюдения за период эксплуатации подтверждают отсутствие несанкционированного доступа к ядерному материалу, любые проверки отработавшего ядерного топлива будут избыточными.

Выводы

Существующие процедуры МАГАТЭ по применению гарантий и проверки отсутствия несанкционированного изъятия или переключения ядерного материала основаны на опыте конвенциональных атомных станций большой мощности в наземном исполнении. Физическое место расположения этих станций фиксировано, а перемещение ядерного материала строго декларируется. В отношении ОПЭБ подобные процедуры МАГАТЭ потребуют адаптации, так как в рамках жизненного цикла место размещения ОПЭБ может быть изменено как в пределах одной страны, так и перенесено в другое государство. При этом страна-поставщик ОПЭБ, страна размещения ОПЭБ, а также мировое сообщество должны быть уверены, что ядерный материал, используемый на ОПЭБ, не подвергся несанкционированным действиям и не будет использован для целей создания ядерного оружия. Гарантом непереключения ядерного материала выступает МАГАТЭ.

Модель эксплуатации ОПЭБ предполагает, что в течение эксплуатации ОПЭБ на площадке в стране размещения доступ к ядерному материалу отсутствует, а все операции по обращению с топливом производятся в РФ на специализированном предприятии. МАГАТЭ может осуществлять проверку учетной документации, а также запрашивать данные о расчетных показателях состояния топлива в реакторе, однако эти показатели невозможно будет верифицировать путем фактической проверки. В период эксплуатации ОПЭБ на площадке размещения ключевое значение будут иметь меры сохранения и наблюдения, а также показатели соответствующего оборудования, подтверждающего отсутствие несанкционированного доступа к ядерному материалу ОПЭБ в течение всего периода эксплуатации. Оптимизация порядка проведения инспекций на площадке размещения позволит адаптировать механизмы гарантий к инновационному дизайну ОПЭБ и аналогичных транспортируемых установок с загрузкой топлива на заводе-изготовителе.

Ввиду невозможности выполнить в ходе эксплуатации на площадке размещения проверку фактически наличного ядерного материала в связи с отсутствием доступа к нему, такая проверка может быть проведена при загрузке топлива в реактор. С юридической точки зрения это может быть сделано на основе специальных договоренностей между страной-поставщиком и МАГАТЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Договор о нераспространении ядерного оружия [Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons]. United Nations – Treaty Series. Vol. 729-13. P. 184-190. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/npt.shtml (дата обращения: 06.12.2022)

2. NFCIRC/327 The Text of the Agreement of 21 February 1985 Between the Union of Soviet Socialist Republics and the Agency for the Application of Safeguards in the Union of Soviet Socialist Republics. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc327_rus.pdf (дата обращения: 02.10.2022)

3. INFCIRC/153 Структура и содержание соглашении между агентством и государствами, требуемых в связи с договором о нераспространении ядерного оружия. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc153_rus.pdf (дата обращения 02.10.2022)

4. INFCIRC/207 Notification to the agency of exports and imports of nuclear material. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/1974/infcirc207.pdf (дата обращения: 02.10.2022)

5. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). URL: http://aris.iaea.org (дата обращения: 01.09.2022)

6. Петрунин В.В. Плавучие энергоблоки с РУ РИТМ-200М. *Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: Физика Ядерных Реакторов.* 2019;(1):91-96.

7. Проектирование систем обращения с топливом и его хранения для атомных электростанций. Серия Стандартов безопасности МАГАТЭ № SSG-63. МАГАТЭ. Вена (2020). URL: https://www.iaea.org/publications/13524/design-of-fuel-handling-and-storage-systems-for-nuclear-power-plants (дата обращения: 01.09.2022)

8. Федеральные нормы и правила Госатомнадзора РФ от 09.07.2001 №7 в области использования атомной энергии «Основные правила учета и контроля ядерных материалов» (НП-030-01). URL: http://gostrf.com/normadata/1/4293852/4293852184.htm (дата обращения: 02.10.2022)

9. Гарантии МАГАТЭ. Глоссарий. Серия международного контроля № 3. 2001. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Glossary_russian.pdf (дата обращения: 06.12.2022)

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Статья выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

FUNDING:
The article was written without attracting external sources of funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Конфликты интересов отсутствуют.

CONFLICT OF INTEREST:
There are absent conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Сергей Анатольевич Душев, главный конструктор оборудования обращения с топливом АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация; e-mail: dushev@okbm.nnov.ru
Игорь Вячеславович Шмелев, начальник департамента внешнеэкономической деятельности и развития новых бизнесов АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация; e-mail: shmelev@okbm.nnov.ru
Павел Анатольевич Горбунов, заместитель главного конструктора РУ ВВР по проекту КЛТ-40 АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация; e-mail: gorbunov@okbm.nnov.ru
Надежда Александровна Сальникова, начальник отдела сопровождения инвестиционных проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8827-867X ; e-mail: salnikovana@okbm.nnov.ru
Алексей Дмитриевич Абросимов, начальник бюро оборудования обращения с ЯТ для АС малой мощности и судовых РУ отдела конструирования комплексов и оборудования перезарядки транспортных ЯЭУ и АС АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация; e-mail: abrosimov-ad@okbm.nnov.ru
Владимир Владимирович Мальев, инженер 2 категории отдела сопровождения инвестиционных проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5023-6455 ; e-mail: malev.vladimir@okbm.nnov.ru
Татьяна Алексеевна Тагирова, инженер 3 категории отдела сопровождения инвестиционных проектов АСММ АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9418-9298 ; e-mail: tagirova.t@okbm.nnov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Sergey A. Dushev, Chief Designer of Fuel Handling Equipment, Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: dushev@okbm.nnov.ru
Igor V. Shmelev, Head of the Division for Foreign Economic Activities and Business Development, Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: shmelev@okbm.nnov.ru
Pavel A. Gorbunov, Deputy Chief Designer of PWR Plants for the KLT-40 Project, Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: gorbunov@okbm.nnov.ru
Nadezhda A. Salnikova, Head of the SMR Projects Support Department, Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8827-867X ; e-mail: salnikovana@okbm.nnov.ru
Aleksey D. Abrosimov, Head of Group Design Department for Refueling Systems and Equipment for Propulsion Nuclear Power Facilities and NPPs, Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: abrosimov-ad@okbm.nnov.ru
Vladimir V. Malev, Engineer (Category 1) of the SMR Projects Support Department, Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5023-6455 ; e-mail: malev.vladimir@okbm.nnov.ru
Tatyana A. Tagirova, Engineer (Category 3) of the SMR Projects Support Department, Joint Stock Company «Afrikantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9418-9298 ; e-mail: tagirova.t@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 16.12.2022
После доработки 04.04.2023
Принята к публикации 13.04.2023

Received 16.12.2022
Revision 04.04.2023
Accepted 13.04.2023

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

УДК 574.5: 621.311.25
DOI 10.26583/gns-2023-02-02
EDN MHRNWW

Совершенствование методов альголизации и биомелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС и приплотинной части Цимлянского водохранилища

О.И. Горская ✉
Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия
✉ *gorskaya-oi@vdnpp.rosenergoatom.ru*

Аннотация. Интенсивное размножение цианобактерий, приводящее к появлению феномена «цветения воды», является одной из наиболее сложных и актуальных проблем многих водоемов. В наиболее уязвимом положении находятся высокоэвтрофные водоемы южных регионов, подверженные регулярному антропогенному воздействию. Уровень проявления «цветения воды» в приплотинной зоне Цимлянского водохранилища на наиболее продуктивных участках открытого и закрытого прибрежья, а также в центральной зоне зачастую является достаточно высоким и требует регулярного проведения комплекса мероприятий по улучшению качества воды. В настоящее время для борьбы со спектром негативных последствий, вызываемых процессами эвтрофикации и гиперпродукции цианобактерий, активно применяются методы биоремедиации, одним их которых является альголизация водоемов планктонными штаммами зеленой микроводоросли Chlorella vulgaris Beijer.

Ключевые слова: Ростовская АЭС, водоем-охладитель, альголизация, система циркуляционного и технического водоснабжения, биолого-химический мониторинг, Цимлянское водохранилище, приплотинный участок, биологическая реабилитация, сине-зеленные водоросли, цианобактерий, «цветение», биологические обрастания, биопленка, кислород, хлорелла.

Для цитирования: Горская О.И. Совершенствование методов альголизации и биомелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС и приплотинной части Цимлянского водохранилища. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):14–24. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-02

Improvement of methods of algolization and biomelioration of the Rostov NPP cooling pond and the near dam part of the Tsimlyansk reservoir

Olga Yu. Gorskaya ✉
Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia
✉ *gorskaya-oi@vdnpp.rosenergoatom.ru*

Abstract. The intensive multiplication of cyanobacteria which results in the phenomenon of «blooming of water» is one of the most complicated and urgent problems of many reservoirs. Highly eutrophic water bodies in southern regions subject to regular anthropogenic impact are in the most vulnerable position. The level of manifestation of «water bloom» in the upstream zone of the Tsimlyanskoye reservoir in the most productive areas of the open and closed coastal zone, as well as in the central zone is often quite high and requires regular implementation of a set of measures to improve water quality. At present, to combat the spectrum of negative effects caused by eutrophication processes and hyperproduction of cyanobacteria, bioremediation methods are actively applied, one of which is algolization of water bodies by planktonic strains of green microalgae Chlorella vulgaris Beijer.

Keywords: Rostov NPP, cooling pond, algolization, circulation and technical water supply system, biological and chemical monitoring, Tsimlyansk reservoir, near dam section, biological rehabilitation, blue-green algae, cyanobacteria, «blooming», biological fouling, biofilm, oxygen, chlorella.

© Горская О.Ю., 2023

For citation: Gorskaya O.Yu. Improvement of methods of algolization and biomelioration of the Rostov NPP cooling pond and the near dam part of the Tsimlyansk reservoir. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):14-24 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-02

При поступлении в водные объекты большого количества органических и биогенных веществ происходит перестройка сообществ водных организмов. Переизбыток органики может оказать негативное воздействие на сообщества гидробионтов за счет снижения концентраций растворенного кислорода в воде, что вызывает необходимость формирования ответной реакции экологической системы, направленный на поддержание ее гомеостаза и процесса самоочищения воды.

Закономерной ответной реакцией различных водных экосистем на обогащение биогенными и органическими веществами является рост развития популяций микроводорослей, которые являются фотосинтезирующим звеном, перерабатывающим органического вещество в растительную биологическую массу. В контексте законов экологии эту реакцию гидробиологической системы можно рассматривать как адаптивную, выражающуюся в стремлении экосистемы сохранить свою жизнеспособность и стабилизировать биотический круговорот, на который непрерывно воздействуют внешние экстремальные воздействия. Подобными способами функционируют естественные пути регуляции экологического равновесия, за счет подобных механизмов происходит эволюция и развитие экологических систем [1].

В результате эвтрофирования водных объектов (повышение содержания в воде биогенных и органических веществ) происходит снижение концентраций растворенного кислорода в воде, особенно в придонных слоях водных объектов. Это, с одной стороны, вызывает заморы рыб, с другой стороны, способствует накоплению восстановленных форм биогенных и органических веществ (азота в виде аммиака и аммонийных ионов, серы в виде сульфидов и др.). Как известно, в состав живого организма азот и сера входят в виде восстановленных соединений аминных и сульфгидрильных групп. Поэтому усвоение и включение в процессы метаболизма экзогенных восстановленных соединений требуют значительно меньших энергетических затрат, чем окисленных [2].

В эвтрофировании природных водоемов особое место занимает фосфор. Это связанно с тем, что фосфор в клетках растений непосредственно участвует в процессах фотосинтеза и дыхания, азотном, углеводном и липидном обменах, активировании ферментных систем. Фосфор входит в состав протоплазмы и ядра клетки.

При снижении степени кислородного насыщения придонных слоев воды соединения фосфора переходят из донных отложений в растворимую форму. Поскольку сине-зеленные водоросли периодически мигрируют в придонные слои воды (в ночное время), они аккумулируют восстановленный фосфор природных слоев и таким образом полностью обеспечивают свои потребности в фосфоре даже при его дефиците в водной толще [3].

Привнос в водный объект большого количества органического вещества, особенно в условиях, когда прекратить или снизить интенсивность этого процесса не представляется возможным запускает биологические процессы, направленные на скорейшую и эффективную его переработку.

Фитопланктонные сообщества являются своего рода природной фабрикой, эффективно перерабатывающей органическое вещество. В состав фитопланктонных сообществ входят представители различных систематических групп водорослей. Возбудителями «цветения» воды являются, как правило, сине-зеленые водоросли из родов Anabaena, Aphanizomenon, Oscillatoria и Microcystis.

В летне-осенний период преобладающей группой фитопланктона Цимлянского водохранилища являются синезеленые водоросли (64-80% средневзвешенной

биомассы). Обычно в этот период доминируют виды родов Microcystis, Aphanizomenon и Planktothrix.

В фитопланктонном сообществе водоема-охладителя Ростовской АЭС и приплотинной части Цимлянского водохранилища вегетируют потенциально токсичные виды сине-зеленых водорослей Aphanizomenon flos-aquae, Aphanocapsa spp, Cuspidothrix issatschenkoi, Planktolyngbya spp., Planktothrix agardhii. Активная вегетация цианобактерий и экстремально высокие показатели их обилия регистрируются в водоемах района расположения Ростовской АЭС период с июня по октябрь, с пиком, приходящимся на середину лета. Массовое увеличение численности сине-зеленых водорослей может приводить к формированию в водоеме, внутренней части системы технического водоснабжения промышленных предприятий особых биологических структур – биопленок. Биопленки представляют собой совокупность микроводорослей и микроорганизмов, в которой клетки встроены в собственный внеклеточный полимерный матрикс и благодаря которому клетки водорослей и бактериальные клетки прикрепляются к друг другу или к поверхности субстрата.

В период «цветения» значительно ухудшаются органолептические характеристики воды, снижается рекреационный потенциал. Помимо этого, экологическое состояние ухудшается поступлением в воду тяжелых металлов (железа, марганца), нефтепродуктов, неорганических форм азота и других загрязняющих веществ. Разлагающиеся сине-зеленые водоросли вызывают негативные явления и в самом водоеме: снижение содержания кислорода, появление цианотоксинов в воде, которое может приводить к гибели всех аэробных организмов. Некоторые виды цианобактерий продуцируют специфические нейро- и гепатотоксины, представляющие серьезную угрозу здоровью людей и животных. Антидотов к токсинам цианобактерий не существует. Рост клеточной биомассы цианобактерий приводит к развитию биопомех на гидротехническом оборудовании и оборудовании системы технического водоснабжения промышленного предприятия. Экологическая реабилитация водоемов представляет собой систему мер, направленных на улучшение его экологического состояния и прилегающей территории с применением современных природоохранных технологий. Также экологическая реабилитация водоема предполагает комплексный подход, включающий улучшение качества воды, увеличение биологического разнообразия гидробионтов, очистку и укрепление берегов. [4]

Используемые в мировой практике различные физические и химические методы «борьбы» с цианобактериями: спуск воды из водоемов с последующим механическим удалением биомассы, аэрирование водных масс, применение ультрафиолетового облучения и ультразвука, использование химических биоцидов – малоэффективны и вместе с тем связаны, с большими финансовыми затратами. Физические методы контроля численности микроводорослей направлены на создание условий, либо препятствующих их развитию, либо разрушающих уже образовавшиеся «маты». Ультразвуковая обработка «цветущей» воды приводит к нежелательным последствиям, хотя и является достаточно эффективной по альгоцидному действию. Обработка «цветущей» воды ультразвуком приводит к ее подкислению, снижает количество общего азота и фосфора в воде, а также повышает температуру воды. Для снижения численности водорослей могут быть использованы химические гербициды, оказывающие альгоцидный эффект. Однако отрицательное влияние на водные биоценозы фактически исключает возможность использования этих веществ, для борьбы с «цветением» и биообрастанием в водной экосистеме [5].

Сезонный цикл ежегодного развития фитопланктона можно описать следующим образом. Структура зимнего, ранневесеннего и позднеосеннего альгоценозов характеризуется значительным преобладанием диатомовых водорослей, не требовательных к питательным веществам и редко достигающих массового развития.

Летом, происходит бурное развитие сине-зеленых водорослей, влекущее массу негативных экологических последствий. Метод коррекции альгоценоза является научно обоснованным и многократно практически подтвержденным способом улучшения экологического состояния любого континентального водоема. Биологическая реабилитация водоемов методом коррекции альгоценоза является составной частью экологической реабилитации. Меры по экологической реабилитации водных объектов включены в федеральные целевые программы по развитию водохозяйственного комплекса Российской Федерации. Известно, что между зелеными и сине-зелеными водорослями в фитопланктонном сообществе складываются антагонистические отношения, что учитывается при биологической реабилитации водоемов, используемых в качестве источников водоснабжения, разведения рыбы, приемников технико-бытовых сточных вод очистных сооружений сельскохозяйственных и промышленных предприятий. Метод коррекции альгоценоза основан на введении в водоем оригинального штаммов одноклеточной зеленой микроводоросли Chlorella vulgaris (альголизация). [4]

Хлорелла (Chlorella sp.) – род одноклеточных зеленых водорослей размером от 2 до 8 микрометров, относящийся к классу хлорофициевые (Chlorophyceae). Встречаются в воде различных пресноводных водоемов. Высокое содержание белка (до 50%), а также других полезных веществ в составе хлореллы (железо, некоторые витамины и др.) дало повод использовать ее как сырье для получения добавок в корма для рыб, а также в качестве корма для личинок некоторых видов рыб и живых кормов. Хлорелла применяется также для альголизации водоемов, очистки вод от различного рода загрязнений, а также для предотвращения цветения в них сине-зеленых водорослей.[1]

Попадая в водоем, планктонный штамм хлореллы не осаждается на дно и не прилипает к высшей растительности, а удерживается в верхнем (40-120 сантиметров) слое воды, где клетки интенсивно делятся. За несколько дней хлорелла становится доминирующей микроводорослью в указанном биотопе. В результате фотосинтеза происходит насыщение воды кислородом. В процессе онтогенеза хлорелла активно потребляет органические и неорганические вещества, что приводит к улучшению качества воды. В результате насыщения воды кислородом происходит снижение содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов. Тяжелые металлы переходят в высшие степени окисления и образуют с анионами нерастворимые соединения. Кислород в период выделения, находясь в атомарном состоянии, обладает повышенной окислительной способностью. Именно в этом состоянии кислород окисляет (разрывает) длинные цепочки гидрофильных углеводородов, входящих в состав нефтепродуктов, образуя гидрофобные обрывки радикалов нефтепродуктов, которые оседают на дно водоемов, где подвергаются дальнейшему разложению с помощью нефтеперерабатывающих бактерий.

Хлорелла препятствует цветению воды посредством прямой конкуренции с цианобактериями, а не только аллелопатии, как предполагалось ранее. Помимо существенного снижения степени «цветения» водоема, хлорелла насыщает воду кислородом (до 14 мг/дм^3) и обеспечивает улучшение качества воды по содержанию загрязняющих веществ. В их числе – тяжелые металлы (Fe, Си, Mn, Pb, Zn), фенолы, нефтепродукты, неорганические формы азота и полифосфаты. Вследствие этого, происходит снижение значений таких важных показателей качества воды, как химическое потребление кислорода (ХПК) и биохимическое потребление кислорода (БПК). Также в результате альголизации улучшаются органолептические показатели и восстанавливается рекреационный потенциал водоема. Вместе с тем, ежегодная

[1] Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 08.10.2021 № 694 «О внесении изменений в справочник в области аквакультуры (рыбоводства)», утвержденный приказом Минсельхоза России № 247 от 05.06.2015.

альголизация создаст предпосылки для организации на водохранилище весьма продуктивного ихтиоценоза. Ведь хлорелла является лучшим кормом для зоопланктона, увеличение численности которого приведет к увеличению рыбного стада, т.е. альголизация приводит к возрождению экологической системы водного объекта. [4]

Практика показала, что вегетативные формы и споры сине-зеленых водорослей уменьшаются в своем количестве за каждый год проведения биологической реабилитации методом коррекции альгоценоза примерно вполовину. Необходимо отметить, что отсутствие «цветения» водоема после проведенной альголизации не является признаком полного освобождения водоема от сине-зеленых водорослей. Через четыре года непрерывной альголизации водоема их остается порядка 6 % от начального количества, что не дает стать сине-зеленым водорослям доминирующими в альгоценозе в летний период. Биологическая реабилитация водоемов с использованием метода альголизации практически не имеет экономической альтернативы, так как затраты на ее осуществление на порядок ниже, чем при любом другом способе борьбы массовым развитием сине-зеленых водорослей.

На качество воды Цимлянского водохранилища большое влияние оказывают сточные воды промышленных и сельскохозяйственных объектов Воронежской и Волгоградской областей. Также, существенная часть загрязняющих веществ поступает в водоток с неорганизованными сбросами и стоками с площади водосбора реки Дон. Характер антропогенного влияния на нижнюю приплотинную зону водохранилища определяется, в основном, степенью развития индустрии и степенью урбанизации прилегающей к водоему территории. В отличие от основной части Цимлянского водохранилища, прибрежная зона Приплотинного плеса находится в зоне влияния ряда городов с достаточно развитой инфраструктурой, а также ряда крупных промышленных предприятий.

Ежегодно в Цимлянском водохранилище наблюдается сильное «цветение» воды за счет развития синезеленых водорослей, биомасса фитопланктона на протяжении нескольких месяцев (июль-октябрь) превышает уровень, при котором, как считается, наступает биологическое загрязнение водоема, более 11 мг/л. На отдельных участках и в заливах за счет нагонных явлений отмечается «гиперцветение», биомасса фитопланктона более 50 мг/л. Днем в таких участках слой синезеленых водорослей может быть настолько плотным, что по нему свободно перемещаются птицы. В подобных местах нагона водорослей отмечается массовая гибель гидробионтов, особенно молоди рыб. В Цимлянском водохранилище, для которого характерны постоянные и сильные перемешивания воды, вызванные ветрами, летние заморы локальны и кратковременны, поэтому не наносят заметного ущерба рыбным запасам [6].

Из акватории Приплотинного плеса Цимлянского водохранилища осуществляется подпитка водоема-охладителя Ростовской АЭС. В этих условиях культура цианобактерий из Цимлянского водохранилища попадает в водоем-охладитель Ростовской АЭС, в котором отсутствуют интенсивные течения, поэтому формирование застойных участков акватории, в которых возможно массовое развитие цианобактерий весьма вероятно, особенно в зоне локусов высшей водной растительности в северной части водоема-охладителя.

Мероприятия по коррекции альгоценоза водоема-охладителя Ростовской АЭС и Приплотинной части Цимлянского водохранилища проводятся регулярно, начиная с

2007 года.[2] Информация об объемах вносимого в водоема альголизата хлореллы в период с 2014 по 2022 год приведена в таблице 1[3].

Таблица 1. Данные о параметрах альголизации водоема-охладителя Ростовской АЭС приплотинного участка Цимлянского водохранилища в период 2014-2022 гг.
Table 1. Data on algolization parameters of the cooling pond of the Rostov NPP near the dam section of Tsimlyanskoye Reservoir in 2014-2022

Год	Объем вселения, л
2014	2100
2015	2400
2016	2340
2017	2610
2018	1440
2019	1380
2020	2070
2021	2520
2022	2480

Альголизация проводится на основании отдельной программы альголизации водных объектов района размещения Ростовской АЭС, в которой указаны оптимальные сроки и объемы ее проведения.

В качестве альголизанта в данной работе используется альгологически чистая культура зеленой хлорококковой водоросли Chlorella vulgaris Beijer, штамм BIN. Альголизант выращивается по промышленной технологии «Algotec» Общий ежегодный объем внесения альголизанта ежегодно варьирует. В 2021 г. объем вносимого альголизанта составил 2520 л суспензии хлореллы. В водоем-охладитель Ростовской АЭС и прилегающую акваторию Приплотинного плеса Цимлянского водохранилища внесено 1500 л суспензии хлореллы, в залив р. Дон в районе профилактория «Белая Вежа» − 1020 л.

Процесс проведения альголизации водоема-охладителя Ростовской АЭС сопровождается проведением анализа видовой структуры фитопланктона водоема-охладителя Ростовской АЭС и Приплотинной части Цимлянского водохранилища, а также его количественных характеристик (численность и биомасса отдельных таксономических групп и видов фитопланктона). Данный анализ проводится как в отношении водоема-охладителя Ростовской АЭС, так и водоема подпитки. В отношении Цимлянского водохранилища, анализируются параметры фитопланктона для Приплотинного плеса, подвергаемого альголизации и участков акватории, в которые суспензия хлореллы не вносится.

Результаты такого анализа показывают, что после внесения суспензии хлореллы происходит перестройка фитопланктонного сообщества, если до момента внесения альголизата в структуре фитопланктона доминируют цианопрокаритоты (рис. 1), то спустя месяц, после внесения в водоем альголизата хлореллы возрастает удельный вес цианобактерий существенно снижается, а превалирующими в структуре фитопланктонного сообщества становятся зеленые водоросли отдела Chlorophyta (рис. 2).

[2] Отчет «Проведение альголизации водоема-охладителя и приплотинного участка Цимлянского водохранилища с целью подавления биологических помех – предотвращения «цветения» водных объектов в 2015 году». – СПб.: ООО НПО «Гидротехпроект». – 2015. – 62 с.
[3] Отчет «Ростовская АЭС. Обоснование мер по сохранению биоресурсов и среды их обитания при осуществлении хозяйственной деятельности по эксплуатации энергоблока № 4 В 18-месячном топливном цикле на мощности реакторной установки 104% от номинальной с вентиляторными градирнями». – СПб.: ООО НПО «Гидротехпроект».

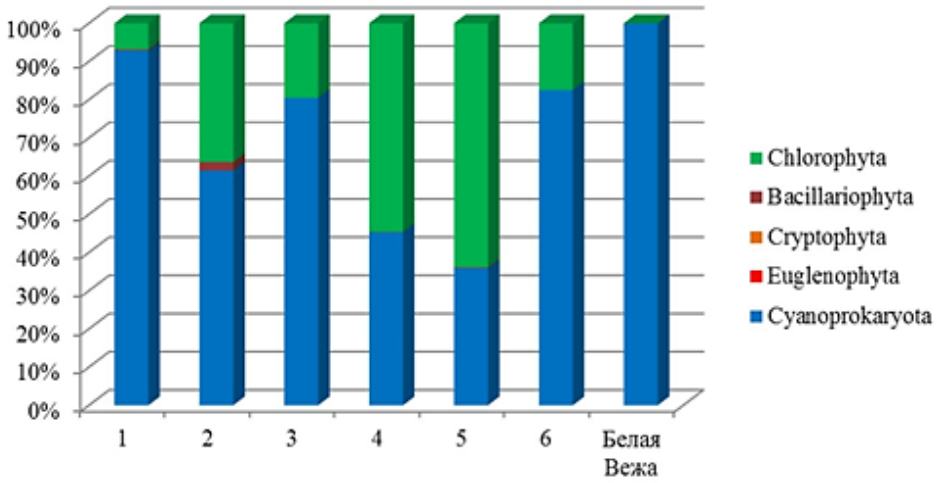


Рисунок 1. Соотношение крупных таксономических групп фитопланктона по численности в водоеме-охладителе Ростовской АЭС (июнь 2021 г.)
Figure 1. Ratio of large taxonomic groups of phytoplankton by number in the cooling pond of Rostov NPP (June, 2021)

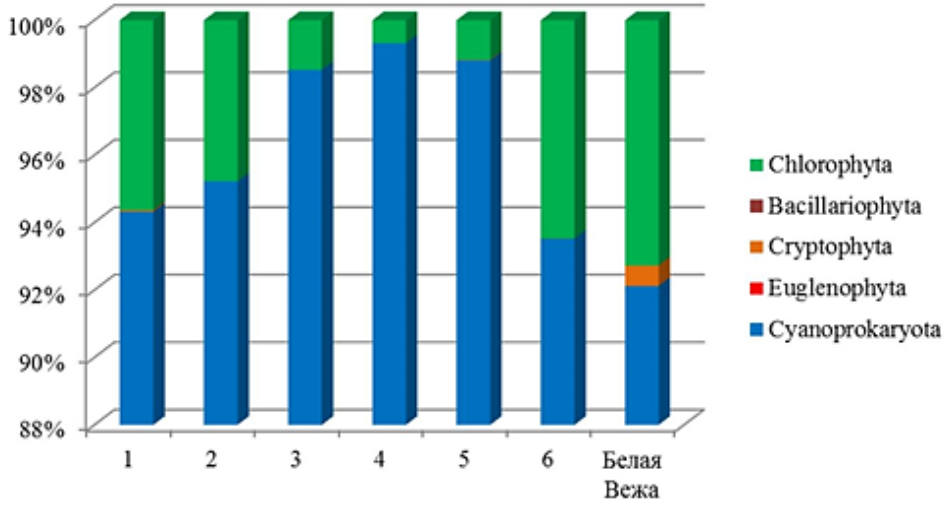


Рисунок 2. Соотношение крупных таксономических групп фитопланктона по численности в водоеме-охладителе Ростовской АЭС (июль 2021 г.)
Figure 2. Ratio of large taxonomic groups of phytoplankton by number in the cooling pond of Rostov NPP (July 2021)

Участки акватории водоема-охладителя Ростовской АЭС и Приплотинной части Цимлянского водохранилища, в которые вносится альголизат хлореллы, имеют ярко выраженные отличия в структуре фитопланктонного сообщества от тех участков акватории Цимлянского водохранилища, в которые альголизат не вносится. На фоне ежегодного интенсивного цветения воды в Цимлянском водохранилище в период с июня по октябрь фактов, свидетельствующих о массовом размножении цианобактерий в водоеме-охладителей и Приплотинном плесе и подавления ими всех других фитопланктонных групп в период с 2007 по 2022 год, не было отмечено ни разу.

Эксперименты по варьированию объема альголизата, вносимого в водоемы, показывают, что скорость развития популяции хлореллы в водных объектах находится в экспоненциальной зависимости от объема ее альголизата, вносимого в водоемы. В этих условиях специалистами Ростовской АЭС рекомендовано увеличить объем ежегодно вносимого альголизата в 1,5-2 раза, увеличив частоту его внесения с 2-3 до 4 раз в течение вегетационного периода. Данные меры будут способствовать

оптимизации гидробиологических параметров водоема-охладителя и водоема подпитки.[4]

Биологическая реабилитация водоема-охладителя Ростовской АЭС и Цимлянского водохранилища, проводимая специалистами Ростовской АЭС, не ограничивается их альголизацией. Ежегодно проводятся мероприятия по биологический мелиорации этих водоемов. Биологическая мелиорация водного объекта предполагает мероприятия, направленные на улучшение состава ихтиофауны и условий выращивания рыб: рациональная добыча ценных рыб и выборочный отлов малоценных, способствование воспроизводству ценных и угнетение размножения малоценных рыб, вселение хищных и растительноядных рыб (белого амура – для регулирования зарастаемости макрофитами, белого толстолобика – для регулирования развития фитопланктона, черного амура – для борьбы с моллюсками, карповых – для общего улучшения гидробиологического статуса водоемов и регулирования соотношения реперных групп гидробионтов)[5].

В 2002 г. была разработана «Программа зарыбления водоема-охладителя растительноядными видами рыб с целью подавления биопомех», в которой предусматривалось зарыбление водоема, которое позволяет получить биомелиоративный эффект и поддерживать стандартные параметры гидробиологического режима водоема-охладителя, обеспечивающие безопасную эксплуатацию АЭС. С 2015 г. Ростовская АЭС активно участвует в программах зарыбления водоемов региона. Место выпуска и объемы зарыбления согласовываются Азово-Черноморским территориальным управлением.

В период 2015-2017 гг. проводится активная работа по зарыблению нижнего Дона в районе г. Азова. За указанный период в Дон выпущено более 64 миллионов штук молоди леща и более 2 миллионов штук молоди сазана. С 2019 г. Ростовская АЭС проводит зарыбление Цимлянского водохранилища. В октябре 2019 г. и сентябре 2020 г. в поселке Приморский (Котельниковский район, Волгоградская область) состоялся массовый выпуск мальков рыбы в Цимлянское водохранилище. В акваторию водоема были выпущены 717 тыс. мальков белого амура и 2,080 млн мальков сазана. В ноябре 2021 г. Ростовская АЭС осуществила выпуск 530 998 штук молоди сазана и 59 201 шт. молоди белого амура в районе хутора Харсеев, вблизи с насосной добавочной воды Ростовской АЭС. В сентябре 2022 г. Ростовская АЭС осуществила выпуск 34040 шт. молоди стерляди в районе поселка Тополькы Азовского района (р. Дон). Затраты составили 791197,50 рубля. В сентябре 2022 г. Ростовская АЭС осуществила выпуск 856128 штук молоди сазана и 418807 шт. молоди белого амура в поселке Приморский (Котельниковский район, Волгоградская область (Цимлянское водохранилище).

Рыбопосадочный материал рыб-мелиораторов приобретался в хозяйствах-производителях Ростовской области, в соответствии с заключенными договорами на поставку. Выпуск рыбопосадочного материала в водоем-охладитель согласовывался с Управлением федеральной службы по ветеринарному и фитосанитарному надзору по

[4] Отчет «Проведение альголизации водоема-охладителя и приплотинного участка Цимлянского водохранилища с целью подавления биологических помех – предотвращения «цветения» водных объектов в 2020 году». – СПб.: ООО НПО «Гидротехпроект». – 2020. – 53 с.

[5] Отчет ГТП–2021–09/13/660/9/158258-Д–01–СД «Проведение альголизации водоема-охладителя, приплотинного участка Цимлянского водохранилища и залива р. Дон в районе профилактория «Белая Вежа» с целью подавления биологических помех – предотвращения «цветения» водных объектов в 2021-2022 годах». – СПб.: ООО НПО «Гидротехпроект» ; Отчет «Ростовская АЭС. Обоснование мер по сохранению биоресурсов и среды их обитания при осуществлении хозяйственной деятельности по эксплуатации энергоблока № 4. В 18-месячном топливном цикле на мощности реакторной установки 104% от номинальной с вентиляторными градирнями». – СПб.: ООО НПО «Гидротехпроект» ; Отчеты «Проведение альголизации водоема-охладителя и приплотинного участка Цимлянского водохранилища с целью подавления биологических помех – предотвращения «цветения» водных объектов в … году» по годам: в 2014 г. (71 с.), в 2015 г. (62 с.), в 2020 г. (53 с.). – СПб.: ООО НПО «Гидротехпроект».

Ростовской области, осуществлялся в присутствии и под контролем представителей ФГУП «Цимлянскрыбвод» и Волгодонской инспекции отдела рыбнадзора по Ростовской области. Объем рыбопосадочного материала, его возрастные и размерные параметры определялись в соответствии с рекомендациями, подготовленными специалистами, на основании разработанных рыбоводно-биологических обоснований и проведенных в течение ряда лет мониторинговых исследований.

Поставщиками рыбопосадочного материала являются СПК «Рыбколхоз им. Абрамова», ООО Рыбхоз «Степной», Рыбхоз «Грачики», НПЦ «Взморье», ООО «Березовский».

Количество интродуцируемого в водоем-охладитель Ростовской АЭС биоматериала указано в таблице 2[6].

Таблица 2. Параметры биомелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС, тыс. особей
Table 2. Parameters of biomelioration of the cooling pond of Rostov NPP, thousand individuals

Год	Виды рыб, тысяч особей			
	Белый амур, толстолобик, карп	Белый амур, толстолобик, черный амур	Карп	Белый амур
2002	89,8	–	–	–
2003	–	54,9	–	–
2005	9,1	–	66,9	
2009	–	–	1,7	–
2011	10,0	–	–	–
2013	10,0	–	–	–
2014	10,0	–	–	–
2017	–	–	1,0	–
2019	10,0	–	–	–
2020	10,0	–	–	–
2021	10,0	–	–	60,0

Эффективность проводимых мер по зарыблению водоема-охладителя Ростовской АЭС и Цимлянского водохранилища трудно переоценить. Благодаря зарыблению, зарастаемость водоема-охладителя Ростовской АЭС макрофитами путем вселений растительноядных видов рыб приведена к необходимым показателям 8 %, оцениваемым как оптимальные для поддержания нормального функционирования водоема.

Интродукция в ихтиоценоз отдельных ценных видов рыб позволяет гармонизировать гидробиологический режим водоемов, регулировать биомассу двустворчатого моллюска дрейссены, гармонизировать структуру фитопланктонных, зоопланктонных и зообентосных сообществ.

Специалистами подрядной организации в качестве мер, направленных на оптимизацию биомелиорации водоема-охладителя Ростовской АЭС в краткосрочной перспективе предложено выполнять зарыбление водоема-охладителя посадочным материалом молоди рыб-планктофагов – белый и пестрый толстолобики, навеской не менее 0,1 кг в объеме – белый толстолобик (2 т/год), пестрый толстолобик (2 т/год) в течение 2-3 ближайших лет, карпом, интродуцируя в водоем-охладитель не более 1-2 тонн молоди карпа (навеской не менее 1 кг) в ближайшие 1-2 года, поскольку

[6] Отчет «Обоснование мер по сохранению биоресурсов и среды их обитания при осуществлении хозяйственной деятельности по эксплуатации энергоблока № 4 Ростовской АЭС в 18-месячном топливном цикле на мощности реакторной установки 104% от номинальной с вентиляторными градирнями». – СПб.: ООО НПО «Гидротехпроект». – 2022. – 155 с.

высокие значения биомассы карпа в водоеме могут негативно отразиться на численности и биомассе зоопланктона в водоеме.

Зарыбление водоема-охладителя белым амуром и черным амуром в настоящий момент было признано нецелесообразным, ввиду невысоких показателей развития биомассы дрейссены в водоеме-охладителе и стабильности уровней развития высшей водной растительности (особенно погруженной) в водоеме-охладителе.

Непрерывный анализ лучших мировых практик по поддержанию экологического благополучия водных объектов, борьбы с биологическими обрастаниями, по предупреждению интродукции в биоценозы чужеродных инвазивных видов, проводимых специалистами Ростовской АЭС в сотрудничестве со специализированными подрядными организациями, позволяет непрерывно совершенствовать методы альголизации и биомелиорации водоема-охладителя и водоема подпитки, а также поддерживать их экологические и эксплуатационные параметры на оптимальном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мелихов В.В., Кузнецов П.И., Московец М.В., Каменев В.М., Каренгина Т.В., Мелихова М.В., Смирнов С.В. Патент №2350570 Российская Федерация. МПК C02F 3/32. Способ регулирования биологического загрязнения водоемов. *Заявитель и патентообладатель ВНИИ орошаемого земледелия РАСХН;* заявл. 07.12.2007; опубл. 27.03.2009.

2. Иванцова Е.А., Карабская А.С. Процессы эвтрофикации в Волгоградском водохранилище и пути их предотвращения. *Современные проблемы повышения продуктивности аридных территорий: материалы международной научно-практической конференции, 14-16 мая 2014 года.* Москва: Вестник РАСХН; 2014. С. 170–173.

3. Сиренко Л.А., Гавриленко М.Я. «Цветение» воды и эвтрофирование. Киев: Наукова Думка; 1978. 231 с.

4. Ушакова И., Лухтанов В., Кульнев В. Биологическая реабилитация водных объектов и сточных вод методом коррекции альгоценоза. *Коммунальный комплекс России.* 2019. URL: http://gkhprofi.ru/biologicheskaya-reabilitatsiya-vodnyh-obektov-i-stochnyh-vod-metodom-korrektsii-algotsenoza/

5. Азизбекян Р.Р., Кузнецова Н.И., Григорьева Т.М. Патент №2382075 Российская Федерация. МПК A01N 63/00, C12N 1/20, C12R 1/07. Штамм бактерий brevibacillus laterosporus, подавляющий и предотвращающий развитие планктонных и биопленочных форм микроскопических водорослей в водных системах. *Заявитель и патентообладатель Государственный НИИ генетики и селекции промышленных микроорганизмов;* заявл. 09.10.2008; опубл. 20.02.2010.

6. Голоколенова Т.Б. Современное состояние фитопланктона в Цимлянском водохранилище. В кн.: *Экологические проблемы загрязнения водоемов Волжского бассейна, современные методы и пути их решения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции.* Волгоград: ВГСХА; 2004. С. 31-32.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Ольга Ивановна Горская, начальник отдела охраны окружающей среды, Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3377-4654 ; e-mail: gorskaya-oi@vdnpp.rosenergoatom.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Olga I. Gorskaya, Head of Environmental Protection Department of RoNPP, Rostov Nuclear Power Plant – branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3377-4654 ; e-mail: gorskaya-oi@vdnpp.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 30.11.2022
После доработки 14.04.2023
Принята к публикации 25.04.2023

Received 30.11.2022
Revision 14.04.2023
Accepted 25.04.2023

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

УДК 621.039.564
DOI 10.26583/gns-2023-02-03
EDN PJXECW

Предиктивная диагностика расходомеров реактора РБМК

А.М. Загребаев, Е.О. Попов ✉
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
✉ *popov.egoriy@yandex.ru*

Аннотация. На данный момент в эксплуатации находится 8 реакторов типа РБМК. Безопасность их эксплуатации обеспечивается за счет приборов контроля за ключевыми показателями. В данной статье основное внимание уделяется именно контролю расхода теплоносителя через топливный канал, осуществляемому с помощью шариковых расходомеров типов ШТОРМ-32М и ШТОРМ-8А. В процессе эксплуатации происходит постепенный износ дорожки качения и шара, что приводит к появлению у прибора отрицательной погрешности, другими словами, показания становятся заниженными. В связи с этим, а также по причине широкого применения шариковых расходомеров на АЭС, актуальной является задача диагностики состояния расходомеров. Одним из подходов к определению расхода теплоносителя является подход, основанный на измерении и использовании информации об активности теплоносителя системой контроля герметичности оболочек ТВЭЛ (СКГО). Использование данного радиационного подхода контроля расхода теплоносителя имеет свои достоинства и сложности. Достоинством является то, что привлекается реальная экспериментальная информация о наличии теплоносителя в топливном канале, а сложности связаны с получением и обработкой сигналов СКГО в реальном режиме времени и вследствие этого с низкой оперативностью решения задачи. В данной работе предлагается методика расчетной предиктивной диагностики состояния расходомера, использующей конструктивные особенности контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) реактора. В качестве диагностического параметра был выбран адаптационный параметр модели K_i. Исследования показали, что рост дисперсии по времени в экспериментальных значениях расхода оказывает явное влияние на выбранный диагностический признак K_i, вследствие чего можно говорить о том, что наблюдение в экспериментальных данных такого рода изменения дисперсии может служить признаком неисправности расходомера.

Ключевые слова: АЭС, РБМК, шариковый расходомер, ШТОРМ-32М, ШТОРМ-8А, расход теплоносителя, ИВК ДШР, СКГО, ТВЭЛ, диагностический признак.

Для цитирования: Загребаев А.М., Попов Е.О. Предиктивная диагностика расходомеров реактора РБМК. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):24–30. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-03

Predictive diagnostics of RBMK reactor flowmeters

Andrey M. Zagrebaev, Egor O. Popov ✉,
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia
✉ *popov.egoriy@yandex.ru*

Abstract. At the moment, there are 8 rectors of the RBMK type in operation. The safety of their operation is ensured by monitoring devices for key indicators. In this article, the main attention is paid to the control of the coolant flow through the fuel channel, carried out with the help of ball flow meters of the STORM-32M and STORM-8A types. During operation, there is a gradual wear of the raceway and the ball, which leads to the appearance of a negative error in the device, in other words, the readings become underestimated. In this regard, as well as due to the widespread use of ball flowmeters at nuclear power plants, the task of diagnosing the state of flowmeters is urgent. One of the approaches to determining the flow rate of the coolant is an approach based on the measurement and use of information about the activity of the coolant by the tightness control system of the fuel element shells (SKGO). The use of this radiation approach to control the flow of coolant has its advantages and difficulties. The advantage is that real experimental information about the presence of a coolant in the fuel channel is involved, and the difficulties are associated with receiving and processing the signals of the SCGO in real time and, consequently, with low efficiency of solving the problem. In this paper, we propose a method for predictive diagnostics of the flow meter condition using the design features of the multiple forced

© Загребаев А.М., Попов Е.О., 2023

circulation circuit (CMPC) of the reactor. The adaptive parameter of the K_i model was selected as a diagnostic parameter. Studies have shown that the increase in time variance in experimental flow values has a clear effect on the selected diagnostic feature K_i, as a result of which it can be said that the observation of this kind of variance change in experimental data can serve as a sign of a malfunction of the flow meter.

Keywords: NPP; RBMK; ball flow meter; STORM-32M; STORM-8A; coolant flow rate; measuring and computing complex for diagnostics of ball flow meters; SKGO; fuel rod; diagnostic feature.

For citation: Zagrebaev A.M., Popov E.O. Predictive diagnostics of RBMK reactor flowmeters. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):24-30 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-03

Введение

На данный момент в эксплуатации находятся 8 реакторов РБМК, безусловно, безопасность их эксплуатации – одна из важнейших задач. Для этой цели разработан целый комплекс средств контроля [1,2]. Одним из контролируемых параметров является расход теплоносителя через топливный канал. Контроль осуществляется с помощью шариковых аксиальных расходомеров ШТОРМ-32М, предназначенных для работы при высоких температурах теплоносителя в технологических каналах первого контура АЭС с реакторами РБМК. Однако в процессе эксплуатации происходит постепенный износ дорожки качения и шара, что приводит к появлению у прибора отрицательной погрешности, другими словами, показания становятся заниженными. Это, в свою очередь, приводит к тому, что расход теплоносителя через канал превышает расчетный [3].

В связи с этим, а также по причине широкого применения шариковых расходомеров на АЭС, актуальной является задача диагностики состояния расходомеров. В настоящее время на АЭС диагностика проводится измерительно-вычислительным комплексом диагностики шариковых расходомеров (ИВК ДШР). ИВК ДШР подключается к измерительному каналу, считывает генерируемый электрический сигнал с магнитоэлектрического преобразователя, частота которого пропорциональна расходу. Диагностика проводится для оценки технического состояния расходомеров с целью своевременной их замены во время ремонта. Диагностика проводится 4 раза:

- после пуска;
- в середине между ремонтами;
- два раза перед остановом с перерывом в 1-2 недели.

Вместе с тем, в межремонтный период иногда возникают дефекты, которые не проявляли себя во время диагностики. К таким дефектам относятся останов вращения шарика ШАДР, загрязнение в канавке качения ШАДР и т.п.

Таким образом, актуальной является задача непрерывной диагностики и прогнозирования состояния расходомеров в процессе эксплуатации в межремонтный период.

Вообще говоря, методика прогнозирования технического состояния любого объекта должна отображать следующую последовательность действий [4]:

1. Разработка математической модели объекта и на ее основе определение набора наиболее значимых параметров и характеристик объекта, определение набора диагностических признаков объекта (ДП), оценка диапазонов допустимых значений ДП, при нахождении объекта в работоспособном состоянии и др.;

2. Построение диагностической модели (ДМ) объекта, получение аналитических зависимостей между непосредственно измеряемыми величинами и ДП объекта, анализ возможностей идентификации полного набора ДП и создание для целей идентификации расчетной программы.

Под диагностическим признаком объекта понимается структурный параметр или характеристика, изменение которой под влиянием внешних факторов и режимов работы оказывает наибольшее влияние на рабочие функции контролируемого объекта.

В качестве диагностической модели объекта предлагается рассматривать модель, в которой связываются диагностические признаки и величины, непосредственно измеряемые в процессе диагностирования.

Таким образом, при контроле технического состояния предлагается выполнить переход из пространства рабочих функций в пространство диагностических признаков, в котором и отслеживается степень приближения объекта к своему предельному состоянию (запас работоспособности) по каждому из этих признаков. Это позволяет подойти к решению задачи оценки остаточного ресурса.

Понятно, что решение этой задачи практически невозможно без использования архивов эксплуатационных параметров, в которых, по сути, содержится вся «жизнь энергоблока». В настоящее время архивы технологических параметров ведутся на всех АЭС с реакторами РБМК и ВВЭР. И задача в этом случае заключается в построении диагностической модели на базе синтеза математической модели, результатов измерений и архивной информации.

Обзор методики определения расхода, опирающейся на информацию об активности теплоносителя

Одним из подходов к определению расхода теплоносителя является подход, основанный на измерении и использовании информации об активности теплоносителя [5].

Суть радиационного подхода заключается в следующем: из отечественной и иностранной литературы известно, что наведенная активность теплоносителя зависит от величины плотности потока быстрых нейтронов, следовательно, от мощности, а в точке измерения активности от времени доставки, т.е. при известном расстоянии – от расхода теплоносителя. Таким образом, величина азотной активности теплоносителя несет в себе информацию и о мощности, и о расходе. Этот факт привлек внимание исследователей более 30 лет назад применительно к корпусным реакторам с водой под давлением. Были созданы и внедрены в эксплуатацию информационные измерительные системы, основанные на этом принципе, позволяющие с высокой точностью определять основные лимитирующие параметры (для расхода теплоносителя первого контура относительная погрешность составляет 2-3%, для тепловой мощности 1,5-2%).

Успешное внедрение контрольно-информационных систем на основе азотной активности на АЭС с реакторами типа ВВЭР вызвало стремление использовать данный информационный канал и на энергоблоках с реакторами типа РБМК. К сожалению, на реакторах типа РБМК нет специальной системы контроля за наведенной активностью теплоносителя. Для этой цели может быть использована система контроля герметичности оболочки ТВЭЛ (СКГО). Вообще говоря, СКГО предназначена для обнаружения канала с увеличенной активностью пароводяной смеси за счет осколков деления в случае нарушения герметичности оболочек ТВЭЛ по соотношению активности коротко- и долгоживущих продуктов деления. Однако, в определенном энергетическом диапазоне (более 3,5 МэВ) эта система фиксирует и наведенную активность теплоносителя за счет реакции $^{16}O\ (n,p)^{16}N_7$.

При этом математические модели активации и методы определения расхода теплоносителя, используемые в реакторах с водой под давлением для реакторов РБМК не применимы. Обусловлено это как кипением воды в канале, так и конструкцией СКГО. Между тем данный подход успешно разрабатывался сотрудниками НИЯУ МИФИ [6,7].

Использование данного радиационного подхода контроля расхода теплоносителя имеет свои достоинства и сложности. Достоинством является то, что привлекается реальная экспериментальная информация о наличии теплоносителя в топливном канале, а сложности связаны с получением и обработкой сигналов СКГО в реальном

режиме времени и вследствие этого с низкой оперативностью решения задачи (раз в сутки, не нарушая штатного режима работы СКГО).

Предлагаемая методика определения расхода

Численный анализ архива эксплуатационных параметров показал, что функция расхода теплоносителя весьма неоднородна, что представляет сложности для ее последующей аппроксимации и экстраполяции. Тоже самое можно сказать и о функции мощности. Также выявлена отрицательная корреляция мощности и расхода, другими словами, увеличение мощности ведет к уменьшению расхода. Важно отметить, что данные зависимости были выявлены при неизменном значении лимба запорно-регулирующего клапана (ЗРК), т.к. его изменение влечет изменения в выше обозначенных параметрах

Таким образом, с целью учета выявленных зависимостей в параметрах, а также в целях повышения оперативности по сравнению с радиационным подходом, можно диагностировать и прогнозировать состояние расходомера в непрерывном режиме между «прокатками СКГО» расчетным путем за счет использования математической модели теплогидравлического тракта и накопленного архива эксплуатационных параметров. Важно при этом понимать, что расчетный прогноз должен, в конечном счете, проверяться ежесуточно экспериментально радиационным способом на основе данных СКГО.

В данной работе предлагается методика расчетной предиктивной диагностики состояния расходомера.

Методика использует конструктивные особенности контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) реактора, схематично изображенного на рисунке 1. Активная зона (АЗ) реактора разделена на две половины, в каждую из которых теплоноситель подается из напорного коллектора (НК) и после прохождения по каналам АЗ собирается в барабане-сепараторе (БС).

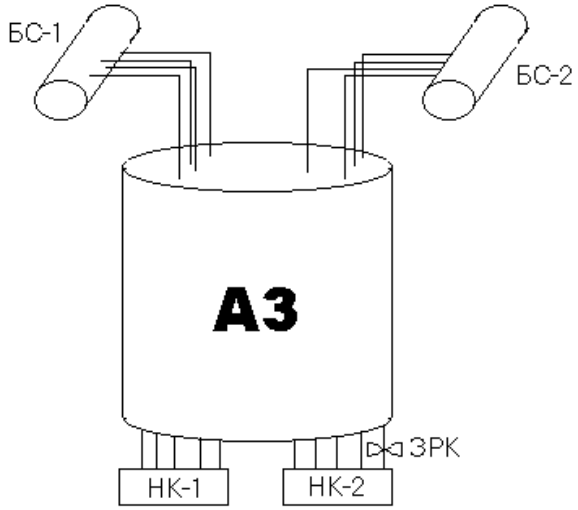


Рисунок 1. Схематичный фрагмент КМПЦ реактора РБМК
Figure 1. Schematic fragment of the multiple forced circulation circuit of the RBMK reactor

Разность давления между НК и БС для всех каналов каждой из половин АЗ одинакова и выражается следующей формулой (1):

$$\Delta P_{\text{эксп}} = P_{\text{НК}} - P_{\text{БС}} . \quad (1)$$

В формуле (1) давления на НК и БС измеряется штатными средствами измерения давления.

Вместе с тем существует математическая модель гидродинамики канала, которая позволяет определить гидродинамическую характеристику каждого $i-$го топливного канала и связать перепад давлений в канале с мощностью канала и расходом теплоносителя через него $\Delta P(G_i, W_i)$. Для учета падения давления на местном сопротивлении после НК и до входа в топливный канал, например, на запорно-регулирующем клапане (ЗРК), вводится поправка $K_i {G_i}^2$.

Таким образом, перепад давлений для каждого канала можно записать выражением (2):

$$\Delta P_{\text{эксп}} = \Delta P(G_i, W_i) + K_i {G_i}^2 . \quad (2)$$

Понятно, что при измеренном значении $\Delta P_{\text{эксп}}$, известной мощности W_i, можно определять либо расход при известном коэффициенте K_i, либо коэффициент K_i при известном расходе теплоносителя G_i.

Отсюда вытекает возможность выбора диагностического параметра. Если в качестве диагностического параметра выбран полученный по математической модели (2) расход $G_{i\text{мод}}$, то следующим этапом требуется его сравнение с измеренным расходом $G_{i\text{изм}}$ по какому-либо алгоритму. Если в качестве диагностического параметра выбран коэффициент K_i, то он также определяется из выражения (2) по известным значениям мощности и измеренным значениям $G_{i\text{изм}}$ и $\Delta P_{\text{эксп}}$ из архива эксплуатационных параметров и сравнивается с текущим значением. Исследования на реальных данных показали, что этот подход более эффективен.

Суть предлагаемой методики заключается в реализации трех этапов:

1. Для каждого канала из архива выбираются временные интервалы, в течение которых не менялось проходное сечение ЗРК;
2. Используя программу теплогидравлического расчета «ГИДРА» и измеренные перепады давления между напорным коллектором и барабан-сепаратором, определяется временная последовательность значений $K_i(t)$;
3. Временная последовательность $K_i(t)$ представляет собой временной ряд диагностического параметра и может исследоваться различными известными методами анализа и прогноза временных рядов [8].

Обсуждение результатов применения предлагаемой методики

В данной работе предлагается следующий алгоритм: архивный временной ряд сглаживается фильтром скользящего среднего и устанавливается апертура – пределы изменения адаптационного параметра $K_i(t)$. Выход текущего значения $K_i(t)$ за апертуру диагностируется как ошибочное значение измеряемого расхода.

Одним из признаков неисправности расходомера может быть рост дисперсии результатов измерений [3]. С целью проверки влияния роста дисперсии на выбранный диагностический признак $K_i(t)$, к реальным значениям расхода теплоносителя в архивных данных ядерного энергоблока Смоленской АЭС за февраль 2016 года, начиная с 10 числа, добавлялась помеха с растущей во времени дисперсией. Исходя из предложенного выше алгоритма, влияние фиксируется в случае выхода $K_i(t)$ за апертуру.

В качестве апертуры были выбраны минимальное и максимальное значения K, полученные по неискаженным данным. К 19 февраля дисперсия выросла более чем на 80% относительно значения на 10 число этого же месяца. Из рисунка 2 видно, что искажение, внесенное в значение расхода, привело к тому, что 19 февраля K превысило верхнюю апертуру.

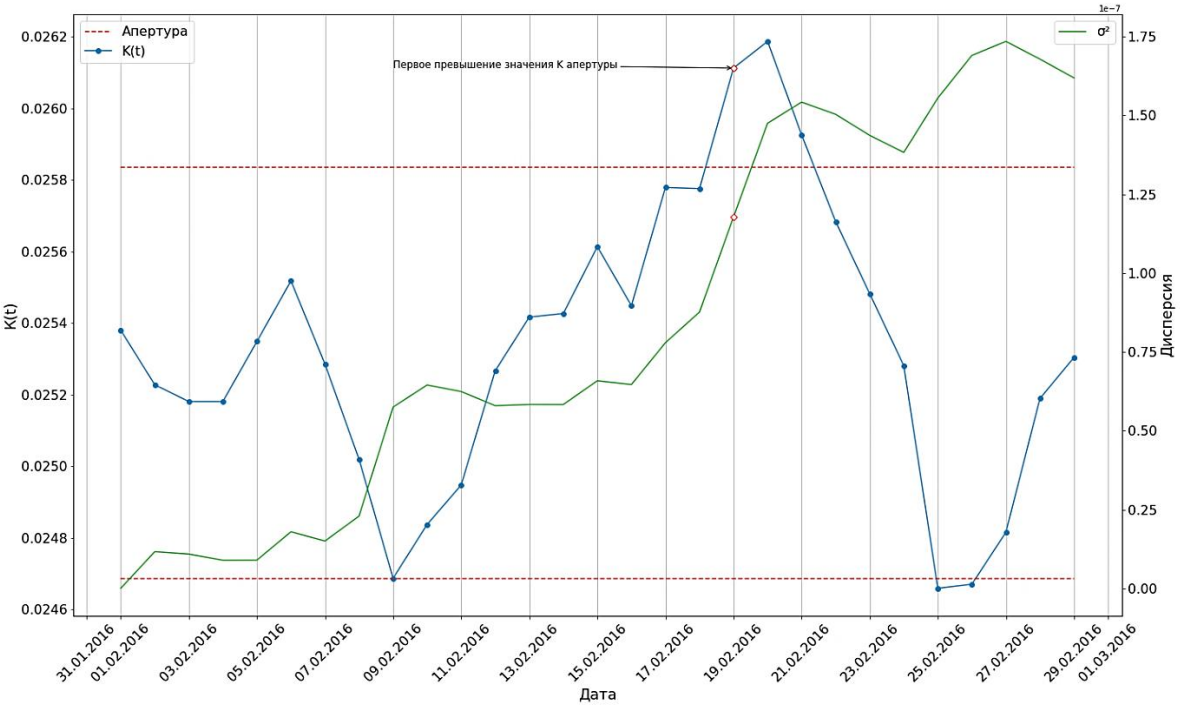


Рисунок 2. График роста дисперсии $K(t)$ в канале 63-22
Figure 2. Graph of $K(t)$ variance growth in channel 63-22

Выход за апертуру в свою очередь говорит о возможной неисправности расходомера.

Выводы

В силу того, что результаты для других каналов качественно совпадают, можно сделать вывод о том, что рост дисперсии по времени в экспериментальных значениях расхода оказывает явное влияние на выбранный диагностический признак $K_i(t)$, вследствие чего можно говорить о том, что наблюдение в экспериментальных данных такого рода изменения дисперсии, может служить признаком неисправности расходомера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Доллежаль Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. Москва: Атомиздат; 1980. 208 с. URL : http://elib.biblioatom.ru/text/dollezhal_kanalnyy-yadernyy-reaktor_1980/go,4/ (дата обращения: 09.11.2022).

2. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК : монография; под общей ред. Ю.М. Черкашова. Москва: ГУП НИКИЭТ; 2006. 631 с. URL: https://cat.gpntb.ru/?id=EC/ShowFull&irbDb=KATBW&bid=Ж2-06/38105 (дата обращения: 05.01.2023).

3. Лысиков Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходометрия ядерных реакторов. Москва: Энергоатомиздат; 1985. 119 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001248090/ (дата обращения: 09.11.2023).

4. Панкин А.М. Методология разработки алгоритмов контроля технического состояния непрерывных объектов. В кн.: *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2016.* 2016;1:56–59. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-razrabotki-algoritmov-kontrolya-tehnicheskogo-sostoyaniya-nepreryvnyh-obektov (дата обращения: 06.03.2023).

5. Агапов С.А., Лысенко В.В., Мусорин А.И., Цыпин С.Г. Радиационные методы измерения параметров ВВЭР; под ред. С.Г. Цыпина. Москва: Энергоатомиздат; 1991. 129 с. https://rusneb.ru/catalog/004191_000025_DONPB-DGPB%7C%7C%7CRETRO6%7C%7C%7C0000001397/ (дата обращения: 09.11.2022).

6. Загребаев А.М., Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. и др. Контроль расхода в технологическом канале РБМК на основе информации об активности теплоносителя. *Атомная энергия.* 2010;2:82–85. URL: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1480 (дата обращения: 09.11.2022).

7. Загребаев А.М, Костанбаев С.В., Овсянникова Н.В. Расчетно-измерительный комплекс контроля расхода в канале реактора РБМК на основе информации об активности теплоносителя. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2010;(1):138–145. URL: https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2010/01.pdf (дата обращения: 09.11.2022).

8. Семиохин С.И. Обзор современных подходов к прогнозированию временных рядов. *Молодежный научно-технический вестник*. 2017(12):12. http://ainsnt.ru/doc/863957.html (дата обращения: 05.01.2023)

ВКЛАД АВТОРОВ:
Загребаев А.М. – постановка задачи, разработка математической модели;
Попов Е.О. – программная реализация математической модели, проведение численных исследований.

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Zagrebaev A.M. – problem statement, development of a mathematical model;
Popov E.O. – software implementation of a mathematical model, conducting numerical studies.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

FUNDING:
The authors state that there is no external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:
The authors declare that there is no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Андрей Маркоянович Загребаев, д.ф.-м.н., профессор кафедры кибернетики, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0576-3587 ; e-mail: amzagrebayev@mephi.ru

Егор Олегович Попов, студент магистратуры по направлению 09.04.04 «Программная инженерия», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2085-8683 ; e-mail: popov.egoriy@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Andrey M. Zagrebaev, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Department Cybernetics, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0576-3587 ; e-mail: amzagrebayev@mephi.ru

Egor O. Popov, Master's degree student in the field of 09.04.04 Software Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2085-8683 ; e-mail: popov.egoriy@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2023
После доработки 28.05.2023
Принята к публикации 04.06.2023

Received 26.01.2023
Revision 28.05.2023
Accepted 04.06.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.791.753.042.4
DOI 10.26583/gns-2023-02-04
EDN SMBSCO

Исследование критериев устойчивости дугового разряда на предельном режиме сварки покрытыми электродами

С.М. Бурдаков [1] ✉, О.Ф. Цуверкалова [1], Ю.В. Заяров [1], Л.В. Постой [2], В.Г. Ткачев [1]

[1]Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия
[2] Общество с ограниченной ответственностью фирма «МОНРЕМ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия
✉ *SMBurdakov@mephi.ru*

Аннотация. В данной работе показаны результаты экспериментов по исследованию влияния вспомогательного напряжения частотой $f_{имп}$=40000Гц на устойчивость дугового разряда постоянного тока при предельном режиме сварочного процесса штучными, покрытыми электродами. Этот эффективный способ соединения прокатных и сборных элементов металлических конструкций нашел повсеместное использование при их монтаже, изготовлении, ремонте в строительстве разнообразных объектов: промышленного и гражданского назначения, сооружений тепловой и атомной энергетики ответственного назначения. В этой связи, повышение качества и технологических, прочностных параметров сварных швов, производительности процесса изготовления металлических конструкций, в большой степени связано с режимами сварки и увеличением устойчивости дугового разряда как важного элемента системы: «источник питания–дуга–сварочная ванна–изделие». Улучшение производительности рассматриваемого процесса сварки, особенно актуально в монтажных условиях в связке с его устойчивостью и является важной, стоящей на повестке дня задачей. При выполнении исследования были приняты во внимание следующие критерии и их значения относительно устойчивости сварочной дуги, такие как: $l_{разр}$–разрывная длина в миллиметрах, коэффициенты вариации: KV($I_{св.осц}$)–сварочного тока, KV($U_{д.осц}$)–напряжения, θ_t–постоянная времени, а так же получены их численные значения. Численные значения указанных выше критериев были получены на основе анализа графиков (осциллограмм) зависимости электрического тока ($I_{св.осц}$, А) и напряжения ($U_{д.осц}$, В) дуги от времени длительности процесса ($t_{проц}$, сек). Полученные результаты проведенного анализа, свидетельствуют о повышении устойчивости, понижении инерции отклонения сопротивления (проводимости) сварочной дуги, при наложении вспомогательного напряжения частотой $f_{имп}$=40000Гц на предельном режиме сварки покрытыми электродами.

Ключевые слова: стальные балки, балочные клетки, монтаж, атомно-энергетическая отрасль, атомные электрические станции, строительно-монтажные работы, строительные конструкции, устойчивость, производительность процесса, ремонтные работы, система «источник питания–дуга–сварочная ванна–изделие», производительность сварочного процесса, критерии устойчивости, покрытый электрод, каплеперенос, динамические характеристики дугового разряда, уравнение динамики дуги.

Для цитирования: Бурдаков С.М., Цуверкалова О.Ф., Заяров Ю.В., Постой Л.М., Ткачев В.Г. Исследование критериев устойчивости дугового разряда на предельном режиме сварки покрытыми электродами. *Глобальная ядерная безопасность.* 2023;13(2):31–38. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-04

© Бурдаков С.М., Цуверкалова О.Ф., Заяров Ю.В. и др., 2023

Arc stability study at the limit mode of welding with coated electrodes

Sergey M. Burdakov [1] ✉, Olga F. Tsuverkalova [1], Yuriy V. Zayarov [1], Lydmila V. Postoy [2], Vladimir G. Tkachev [1]

[1] *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia*

[2] *Limited Liability Company Firm «MONREM», Volgodonsk, Rostov region, Russia*

✉ *SMBurdakov@mephi.ru*

Abstract. This paper shows the results of experiments to study the effect of the auxiliary voltage with frequency fi= 40000Hz on the stability of arc discharge at the limit mode of the welding process with single, coated electrodes. This effective method of connecting rolled and prefabricated elements of metal structures has found widespread use in their installation, manufacture and repair in the construction of various facilities: industrial and civil purposes, thermal and nuclear power facilities for responsible purposes. In this regard, the increase in the quality and technological, strength parameters of welds, the productivity of the manufacturing metal structure process, is largely associated with welding modes and an increase in the stability of arc discharge as an important element of the system: "power source-arc-welding tub-product." Improving the performance of the welding process under consideration is particularly important under mounting conditions in conjunction with its stability is an important task on the agenda. When performing the study, the following criteria and their values regarding the stability of the welding arc were taken into account, such as: lexpl - rupture length in mm, coefficients of variation: KV(Iwd) - welding current, KV(Uwd) - voltage, qt - constant time, as well as their numerical values were obtained. The obtained numerical values of the above criteria were obtained based on the analysis of graphs (oscillograms) of the dependence of the electric current (Iwd, A) and the voltage (Uwd, V) of the arc on the time of the process duration (t, sec). The obtained results of the analysis indicate an increase in stability, a decrease in inertia of the deviation of the resistance (conductivity) of the welding arc when the auxiliary voltage is applied with a frequency of fi = 40000Hz at the limit mode of welding with coated electrodes.

Keywords: steel beams, beam cages, installation, nuclear power industry, nuclear power plants, construction and installation works, building structures, stability, process performance, repair work, power supply-arc-welding tub-product system, welding process performance, stability criteria, coated electrode, drop transfer, arc discharge dynamic characteristics, arc dynamics equation.

For citation: Burdakov S.M., Tsuverkalova O.Yu., Zayarov Yu.V., Postoy L.V., Tkachev V.G. Arc Stability Study at the limit mode of welding with coated electrodest. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):31-38 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-04

Введение

В рамках атомно-энергетической отрасли идет увеличение возведения и грядущий ввод в эксплуатацию новых тепловых и атомных электрических станций, а также объектов их инфраструктуры и обеспечения, ведется проведение планово-предупредительных ремонтов на их базе. Выполняемые строительно-монтажные, ремонтные работы проводятся с использованием государственного контроля и поддержки. На сегодняшний день этому успешно способствует проведение текущей реформы ценообразования в строительной отрасли Российской Федерации с 2020 г. по 2023 г. включительно [1], введение государственной программы «Строительство» с 1.01.2023 г.[2], что позволит сократить сроки возведения строек, финансируемых из бюджета и число долгостроев.

В промышленных и отраслевых объектах, в том числе тепловой и атомной энергетики металлические конструкции на основе сталей, в основном применяют, в

[1] Приказ Минстроя России от 04.08.2020 N 421/пр «Об утверждении Методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 23.09.2020 N 59986). Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_362957/ (дата обращения: 19.03.2023).

[2] Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.04.2022 № 829-р. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202204120022 (дата обращения: 10.03.2023).

составе элементов каркасов, оснований и опор оболочек. Это могут быть центрально-сжатые и внецентренно-сжатые колонны, прокатные и сварные балки, стальные рабочие площадки со сплошными и решетчатыми настилами, а также образуемые ими балочные клетки, различного рода фермы. Соединение составных элементов названных конструкций в составе каркасов или балочных клеток на монтаже в основном осуществляется с применением ручной дуговой сварки штучными, покрытыми электродами[3].

Сокращение сроков возведения объектов строительства, напрямую связано с штучно-калькуляционным временем выполнения сборочно-сварочных работ при изготовлении, ремонте и монтаже стальных элементов объекта строительства. Повышение качества и технологических, прочностных параметров сварных соединений, производительности сварочного процесса напрямую связано с его режимами проведения и увеличением устойчивости дугового разряда как важного элемента системы: «источник питания—дуга—сварочная ванна—изделие» [1].

Увеличение производительности сварочного процесса может быть осуществлено применением сварочных материалов: электродов больших диаметров, режимами сварки: применением сварочного тока предельных паспортных значений (максимального и минимального сварочного тока, для выбранной марки штучного, покрытого электрода), что в отдельных случаях вызывает повышение коэффициента разбрызгивания металла [2].

Улучшение устойчивости дугового разряда на предельных режимах сварки, будет способствовать стабилизации и повышению технологических свойств соединения, производительности процесса производства в целом, эксплуатационной надежности металлических конструкций.

Методы исследования

Основной целью представленной работы является определение воздействия накладываемого вспомогательного напряжения $U_{имп}$=80,0В, частотой $f_{имп}$=40000Гц (QPC) на критерии устойчивости дуги постоянного тока при предельном режиме сварки штучными, покрытыми электродами.

Формирование воздействия вспомогательным напряжением $U_{имп}$=80,0В, частотой $f_{имп}$=40000Гц на дуговой разряд постоянного тока было выполнено с помощью специального генератора, в составе информационно-измерительной и управляющей системы, при параллельном его подключении к основному источнику питания (ВДУ–504) [3]. Регулировка сварочного тока основного источника (ВДУ–504) осуществлялась внутренней электронной схемой управления с контролем по встроенному амперметру.

При выполнении исследования для определения устойчивости сварочной дуги использовались определенные критерии, такие как: $l_{разр}$, – разрывная длина [3-5], коэффициенты вариации: $KV(I_{св.осц})$, – сварочного тока, $KV(U_{д.осц})$, – напряжения, θ_t, – постоянная времени [6-8].

Методические указания и рекомендации для выполнения проведенных экспериментов были представлены в литературных источниках [3,9,10].

На основании ТУ 1272-125-55224353-2013(технические условия) на сварочные плавящиеся покрытые электроды марки УОНИИ 13/55 номинальным диаметром $d_{электр}$=3,00мм, максимальный сварочный ток для нижнего положения сварочной ванны составляет: $I_{св.осц}$=130А, а минимальный: $I_{св.осц}$=90А.

В рамках данной работы определяли устойчивость дугового разряда в нижнем расположении сварочной ванны без разделки кромок на пластине толщиной t=10мм из

[3] Приказ Минстроя России от 27.02.2017 N 126/пр Об утверждении СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции» URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_278905/ (дата обращения: 04.03.2023).

стали марки ВСт3сп5, с использованием воздействия на сварочную дугу вспомогательного напряжения $U_{имп}$=80,0В, частотой $f_{имп}$=40000Гц и без воздействия указанным напряжением.

Результаты проведенных исследований

С помощью специальной информационно-измерительной и управляющей системы, осуществляющей формирование вспомогательного напряжения $U_{имп}$=80,0В, частотой $f_{имп}$=40000Гц и съем графиков–осциллограмм зависимости электрического тока ($I_{св.осц}$, А) и напряжения ($U_{д.осц}$, В) дуги от времени длительности процесса ($t_{проц}$, сек) (см. рис. 1) [10].

Для определения значений коэффициентов вариации KV($I_{св.осц}$) для сварочного тока, и напряжения KV($U_{д.осц}$), постоянной времени дуги θ_t, была проведена обработка полученных зависимостей электрического тока ($I_{св}$=$I_{св.осц}$, А) и напряжения ($U_д$=$U_{д.осц}$, В) дуги от времени длительности процесса ($t_{проц}$, сек) в специально разработанной программе для Mathcad©.

При сварочном процессе на минимальном токе: $I_{св.осц}$=90А (без (QPC)), получили следующие значения параметров устойчивости: $l_{разр}$=14мм, KV($I_{св.осц}$)=30,488, KV($U_{д.осц}$)=51,648. $I_{св.осц}$=90А (с (QPC) $f_{имп}$=40000Гц): $l_{разр}$=28мм, KV($I_{св.осц}$)=43,597, KV($U_{д.осц}$)=38,021.

При сварочном процессе на максимальном токе: $I_{св.осц}$=130А (без (QPC)), получили следующие значения параметров устойчивости: $l_{разр}$=16мм, KV($I_{св.осц}$)=13,887, KV($U_{д.осц}$)=14,596. $I_{св.осц}$=130А (с (QPC) $f_{имп}$=40000Гц): $l_{разр}$=31мм, KV($I_{св.осц}$)=16,379, KV($U_{д.осц}$)=14,322.

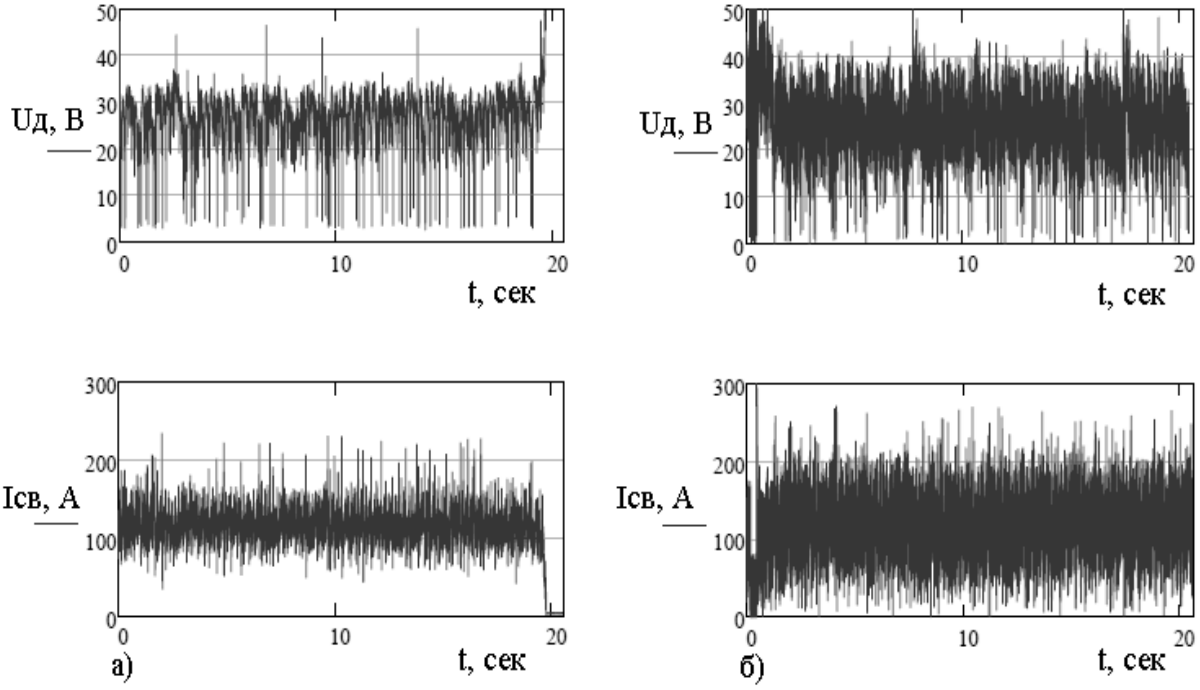


Рисунок 1. Зависимости электрического тока ($I_{св.осц}$, А) и напряжения ($U_{д.осц}$, В) дуги от времени длительности процесса (t=$t_{проц}$, сек), время измерения $t_{проц}$=17,00 сек: а)$I_{св}$=$I_{св.осц}$=130А; б)$I_{св}$=$I_{св.осц}$=130А с (QPC) $f_{имп}$=40000Гц

Figure 1. Dependences of electric current(Iwd A) and arc voltage(Uwd, V)on process time(t, sec), measurement time t=17,00 sec: a)Iwd=130A; b)Iwd=130A with QPC fi=40000Hz

Стабильно растущее значение KV($I_{св.осц}$) в более чем 1,4 раза может обозначать увеличение частоты переноса капель металла с электрода в сварочную ванну когда

применяется (QPC) при токе сварки $I_{св}$=130А. Понижение KV($U_{д.осц}$) в 1,02–1,4 раза может свидетельствовать о повышении стабильности падения напряжения на дуге при наложении (QPC) $f_{имп}$=40000Гц на исследуемом сварочном режиме.

Условия устойчивости сварочной дуги может быть определены с помощью использования уравнения динамики, и получения на основе него величины постоянной времени θ_t, определяющей инерцию вариаций сопротивления (проводимости) плазменного объема дуги при изменении тока в системе «источник питания—дуга—сварочная ванна—изделие» (рис. 2).

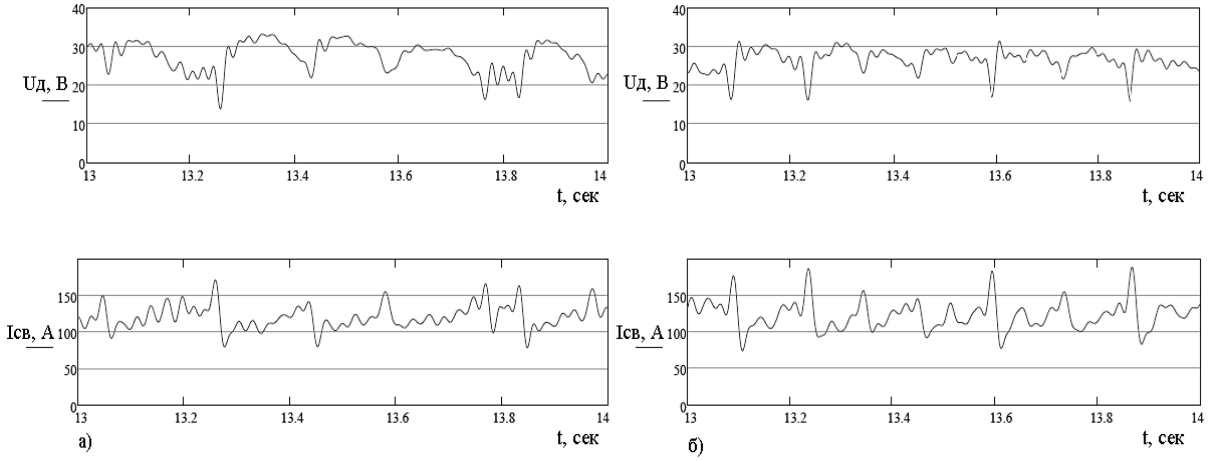


Рисунок 2. Зависимости электрического тока ($I_{св.осц}$, А) и напряжения ($U_{д.осц}$, В) дуги от времени длительности процесса (t=$t_{проц}$, сек), время измерения $t_{проц}$=1,00 сек: а) $I_{св}$=$I_{св.осц}$=130А; б) $I_{св}$=$I_{св.осц}$=130А с (QPC) $f_{имп}$=40000Гц

Figure 2. Dependences of electric current (I_{wd} A) and arc voltage (U_{wd}, V)*on process time(t, sec), measurement time t=1,00sec: a) I_{wd}=130A; b) I_{wd}=130A with QPC f_i = 40000Hz*

Уравнение динамики дуги в дифференциальной форме имеет вид формулы (1) [9]:

$$\theta_t \frac{dU_д}{dt} + U_д = \theta_t R_{ст} \cdot \frac{dI_{св}}{dt} + R_д I_{св}, \quad (1)$$

где θ_t – постоянная времени дуги;

$R_д$ – дифференциальное сопротивление дуги, определялось из вольтамперной характеристики;

$R_{ст}$ – статическое сопротивление дуги, определяется из вольтамперной характеристики дуги, как отношение параметров режима сварки, Ом.

Следовательно, исходя из формулы (1), можно определить параметр θ_t выражением (2):

$$\theta_t = \frac{R_д I_д - U_д}{\frac{dU_д}{dt} - \frac{dI_д}{dt} R_{ст}}. \quad (2)$$

Так при режиме сварки на $I_{св.осц}$=90 А (без (QPC)), θ_t=0,04сек, соответственно для сварки на режиме $I_{св.осц}$=90А (с QPC) $f_{имп}$=40000Гц, θ_t= 0,018сек.

Так при режиме сварки на $I_{св.осц}$=130 А (без (QPC)), θ_t=0,079сек, соответственно для сварки на режиме $I_{св.осц}$=130А (с QPC) $f_{имп}$=40000Гц, θ_t=0,032сек.

После вычислений значения θ_t показывают фактическое (более чем в два раза) уменьшение инертности варьирования электропроводности дуги, когда используется

наложение на него (QPC) $f_{имп}$=40000Гц при исследуемом режиме сварки. Подобное улучшение устойчивости наблюдалось так же при ее определении исходя из показателей разрывной длины дуги $l_{разр}$ [3]. Изменения показателей устойчивости на исследуемых режимах ведения сварочного процесса может быть связано с возникающими новыми условиями ионизации и рекомбинации носителей заряда (ионов и электронов) в плазме электродугового разряда, что было показано в работах: а) об устойчивости горения сварочной дуги с использованием информационно-измерительной и управляющей системы; б) о физической модели электрического дугового разряда с наложением высокочастотного напряжения [10,11].

Используя результаты обработки осциллограмм (см. рис. 1,2) сварочного электродугового разряда, можно определить его динамические характеристики в плане исследования устойчивости на примере скоростей изменения силы сварочного тока и напряжения обозначенных как $dI_{св.осц}/dt$ и $dU_{д.осц}/dt$ соответственно. По данным работы А.Ф. Уварова [12] пониженные величины $dI_{св.\ осц}/dt$ и $dU_{д.осц}/dt$ способствуют уменьшению устойчивости электродугового разряда что сказывается в целом на качестве, а также на технологических, прочностных параметрах выполняемых сварных соединений, производительности сварочного процесса.

Для указанных выше условий ведения сварочного процесса ($I_{св.осц}$=90А (без (QPC)) и $I_{св.осц}$=90А (с QPC) $f_{имп}$=40000Гц), были получены следующие результаты по максимальным скоростям изменения $dI_{св.осц.max}/dt$ и $dU_{д.осц.max}/dt$:

$dI_{св.осц.max}/dt = 8{,}913\cdot10^3$, А/сек; $dU_{д.осц.max}/dt = 2{,}035\cdot10^3$, В/сек – без (QPC);

$dI_{св.осц.max}/dt = 1{,}34\cdot10^4$, А/сек; $dU_{д.осц.max}/dt = 2{,}158\cdot10^3$, В/сек – без (QPC).

При режиме: ($I_{св.осц}$=130 А (без (QPC)) и $I_{св.осц}$=130А (с QPC) $f_{имп}$=40000Гц), были получены следующие результаты по максимальным скоростям изменения $dI_{св.осц.max}/dt$ и $dU_{д.осц.max}/dt$:

$dI_{св.осц.max}/dt = 8{,}504\cdot10^3$, А/сек; $dU_{д.осц.max}/dt = 1{,}949\cdot10^3$, В/сек – без (QPC);

$dI_{св.осц.max}/dt = 8{,}546\cdot10^3$, А/сек; $dU_{д.осц.max}/dt = 2{,}812\cdot10^3$, В/сек – с (QPC).

Выводы

Подводя итог с использованием выше полученных результатов при применении максимального сварочного тока предельных паспортных значений в режиме сварочного процесса для заданной марки электрода ($d_{электр}$=3,00 мм), отметим, что использование QPC $f_{имп}$=40000 Гц приводит к повышению динамических характеристик электродугового разряда и способствует улучшению условий обеспечения его устойчивости. Обеспечение этих условий приводит так же к формированию мелкозернистой структуры сварного соединения и повышению его прочностных и служебных свойств, что было показано в работе о структуре металла сварных соединений при импульсном воздействии на дуговой разряд [13].

Использование покрытых электродов исследуемой марки на предельных паспортных режимах так же может быть рекомендовано при сварке металлических конструкций с применением системы комбинированного питания (QPC) дугового разряда в нижнем положении сварочной ванны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Чернышев Г.Г., Ковтун В.Л. Возможности повышения производительности при дуговой сварке. *Труды МВТУ*. 1985;(434):31-41.

2. Хромченко Ф.А. Надежность сварных соединений труб котлов и паропроводов. Москва: Энергоиздат; 1982. 120 с.

3. Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Кавришвили З.О., Бурдаков С.М. Повышение устойчивости горения дуги при сварке покрытыми электродами. *Сварочное производство.* 2000;(2):7–9.

4. Бурдаков С.М., Орехов М.И. Анализ способов повышения и критериев оценки устойчивости сварочного дугового разряда. *Инженерный вестник Дона.* 2016;(2). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3594 (дата обращения: 04.03.2023).

5. Хренов К.К. Электрическая сварочная дуга. Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы; 1949. 203 с.

6. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. Москва: Машиностроение; 1970. 335 с.

7. Букаров В.А., Ермаков С.С., Дорина Т.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов. *Сварочное производство.* 1990;(12):30-32.

8. Самервил Дж.М. Электрическая дуга. Москва: Государственное энергетическое издательство; 1962. 119 с.

9. Бурдаков С.М., Чернов А.В., Цуверкалова О.Ф., Зокиров К.Д. Управление газодинамическими характеристиками дугового разряда с помощью квазигармонической компоненты питания. *Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XVI Международной научно-практической конференции, 12-13 ноября 2020 г.* Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ; 2020. С. 63–66. ISBN 978-5-72622472-5. URL: https://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii (дата обращения: 04.03.2023).

10. Бурдаков С.М. Экспериментальные исследования устойчивости горения сварочной дуги с использованием информационно-измерительной и управляющей системы. *Сборник докладов 5-й Международной научной-практической конференции «Качество науки – качество жизни», Тамбов, 26-27 февраля 2009 г.* Тамбов: Центр Конференций ТГТУ; 2009. С. 54.

11. Бурдаков С.М., Чернов А.В., Полетаев Ю.В., Полежаев С.В. Физическая модель электрического дугового разряда с наложением высокочастотного напряжения. *Сварочное производство*. 2001;(11):13–16.

12. Уваров А.Ф. Транзисторный инверторный источник питания для импульсной дуговой сварки. *Сварочное производство.* 1988;(10):25–26.

13. Бурдаков С.М., Дамаскина М.Б., Желецкий Д.И. Исследование структуры металла сварных соединений при импульсном воздействии на дуговой разряд. *Глобальная ядерная безопасность.* 2021;(1):38–43.

ВКЛАД АВТОРОВ:
Бурдаков С.М. – разработка теории, оборудования, планирование и проведение экспериментов, расчетов, выполнение анализа результатов экспериментов, разработка программного обеспечения;
Цуверкалова О.Ф. – разработка теории математического анализа значений критериев устойчивости дугового разряда, выполнение анализа результатов экспериментов и расчетов;
Заяров Ю.В. – выполнение анализа результатов расчетов, руководство научно-исследовательской работой и проверка ее результатов;
Постой Л.В. – выполнение анализа результатов экспериментов, анализ результатов расчетов, работа с нормативной документацией;
Ткачев В.Г. – статистический анализ результатов, создание рукописи статьи при поддержке С.М. Бурдакова

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Burdakov S.M. – development of theory, equipment, planning and conducting experiments, calculations, analysis of experimental results, software development;

Tsuverkalova O.F. – development of the theory of mathematical analysis of the values of the arc discharge stability criteria, analysis of the results of experiments and calculations;
Zayarov Yu.V. – analysis of the results of calculations, management of research work and verification of its results;

Postoy L.V. – analysis of the results of experiments, analysis of the results of calculations, work with regulatory documentation;
Tkachev V.G. – statistical analysis of the results, creation of the manuscript with the support of S.M. Burdakov.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Авторы заявляют об отсутствии финансовой помощи при проведении исследования.

FUNDING:
No funding was received by the author for this research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:
The author declares no relevant conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Сергей Михайлович Бурдаков, к.т.н., доцент кафедры строительных производств, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8599-6008 ; e-mail: SMBurdakov@mephi.ru
Ольга Феликсовна Цуверкалова, к.т.н., заведующий кафедрой информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6304-4498 ; e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Sergey M. Burdakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Construction Industries, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8599-6008 ; e-mail: SMBurdakov@mephi.ru
Olga F. Tsuverkalova, Cand. Sci. (Econ.), Head and Associate Professor, Department of Information and Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6304-4498 ; e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

Юрий Владимирович Заяров, к.т.н., заведующий кафедры строительных производств, доцент кафедры строительных производств Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3353-8037 ; e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Людмила Викторовна Постой, к.т.н., инженер производственно-технического отдела Общество с ограниченной ответственностью фирма «МОНРЕМ», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6637-7976 ; e-mail: monrem@mail.ru

Владимир Григорьевич Ткачев, к.т.н., доцент кафедры строительных производств Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6615-1167 ; e-mail: VGTkachev@mephi.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023
После доработки 26.05.2023
Принята к публикации 30.05.2023

Yuriy V. Zayarov, Cand. Sci. (Eng.), Head and Associate Professor, Department of Construction Industries, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3353-8037 ; e-mail: YVZayarov@mephi.ru

Lydmila V. Postoy, Cand. Sci. (Eng.), Engineer of the production and technical department Limited Liability Company MONREM, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6637-7976 ; e-mail: monrem@mail.ru

Vladimir G. Tkachev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Construction Industries, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6615-1167 ; e-mail: VGTkachev@mephi.ru

Received 27.03.2023
Revision 26.05.2023
Accepted 30.05.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 620.179.13: 621.039.5
DOI 10.26583/gns-2023-02-05
EDN TFDGAT

Представление результатов электрического контроля методом электрофизической хроматографии

В.И. Сурин [1] ✉, А.С. Щербань [2], А.А. Щербаков [1], М.Б. Иваний [1], М.Е. Жидков [2], С.А. Томилин [3], А.В. Козлов [2]

[1] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
[2] Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Ростовская обл., Россия
[3] Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия
✉ *VISurin@mephi.ru*

Аннотация. Впервые для визуализации результатов электрического неразрушающего контроля предложен метод электрофизической хроматографии. Поверхностные потенциограммы, обычно применяемые для представления результатов сканирующей контактной потенциометрии, заменяются объемными изображениями структурных неоднородностей. Альтернатива имеет очевидные преимущества, поскольку полезная дополнительная информация способна кардинально изменить результаты контроля, что и продемонстрировано на примере сварного соединения наплавки. Сформулированы и реализованы методические рекомендации для построения объемных изображений дефектов. Обсуждаются причины самоэкранирования структурных неоднородностей на разных уровнях фиксации, обусловленные взаимным пространственным перекрытием микрообластей, излучающих волны упругих напряжений. Наибольшие проблемы идентификации дефектов для ЭНК представляют их полная или частичная экранировка. Для метода электрофизической хроматографии необходим хотя бы один экспериментальный массив, полученный из следующих измерений: двойного сканирования поверхностей объекта контроля; двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля; двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля с применением синхронизатора излучений по времени или по частоте. В случае сканирования по одной (внешней или внутренней) поверхности координаты дефектов определяются по соответствующим поперечным сечениям и расчетными значениями их глубины с применением частотного и частотно-временного анализа.

Ключевые слова: электрический неразрушающий контроль, метод сканирующей контактной потенциометрии, техническая диагностика и неразрушающий контроль реакторного оборудования, электрофизическая хроматография.

Для цитирования: Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А., Иваний М.Б., Жидков М.Е., Томилин С.А., Козлов А.В. Представление результатов электрического контроля методом электрофизической хроматографии. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):39–49. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-05

Presentation of electrical control results by electrophysical chromatography method

Vitaly I. Surin [1] ✉, Alexander S. Shcherban [2], Alexander A. Shcherbakov [1], Mikhail B. Ivanyi [1], Maxim E. Zhidkov [2], Sergey A. Tomilin [3], Alexander V. Kozlov [2]

© Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А. и др., 2023

[1] *National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*
[2] *«Atommash» the branch of JSC «AEM-Technologies», Volgodonsk, Rostov region, Russia*
[3] *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia*
✉ *VISurin@mephi.ru*

Abstract. A method of electrophysical chromatography was proposed to visualize the results of electrical non-destructive testing for the first time. Surface potentiograms usually used to represent the results of scanning contact potentiometry are replaced by volumetric images of structural inhomogeneities. The alternative has obvious advantages as useful additional information can drastically change the results of testing which is demonstrated by the example of a weld overlay. Methodological recommendations for constructing volumetric images of defects are formulated and implemented. The causes of self-shielding of structural inhomogeneities at different levels of fixation which are due to the mutual spatial overlap of microregions emitting waves of elastic stresses are discussed. The biggest problems in identifying defects for NDT are their complete or partial screening. The electrophysical chromatography method requires at least one experimental array obtained from the following measurements: double scanning of the surfaces of the test object; double simultaneous scanning of the surfaces of the test object; double simultaneous scanning of the surfaces of the test object using a radiation synchronizer in time or frequency. In the case of scanning along one (external or internal) surface, the coordinates of defects are determined from the corresponding cross sections and the calculated values of their depth using frequency and time-frequency analysis.

Keywords: electrical non-destructive testing, scanning contact potentiometry, technical diagnostics and non-destructive testing of reactor equipment, electrophysical chromatography.

For citation: Surin V.I., Shcherban A.S., Shcherbakov A.A., Ivanyi M.B., Zhidkov M.E., Tomilin S.A., Kozlov A.V. Presentation of electrical control results by electrophysical chromatography method. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):39-49 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-05

Введение

Результаты электрического неразрушающего контроля можно представить не только поверхностными потенциограммами, но и объемными изображениями в цвете, полученными методом электрофизической хроматографии. Разработанный нами метод позволяет получать объемные изображения внутренних структурных неоднородностей в металлах с помощью функции распределения потенциалов на поверхности. Координаты неоднородностей, их размеры и форма определяются с помощью поверхностных потенциограмм, построенных механическим сканированием поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а затем перестраиваются в объемные изображения.

В качестве примера приводится построение объемного изображения непровара в сварном соединении трубы с наплавкой. Результаты контроля трубы с наплавкой «И», №5, АМ 117.03.02.540 методом сканирующей контактной потенциометрии (СКП) приведены в предыдущей статье авторов [1]. Контролируемым объектом являлась наплавка на трубе, представляющая собой цилиндрическую поверхность со скошенным торцом. Сканирование выполнялось по цилиндрической и торцевой поверхности наплавки. Толщина наплавленного слоя равнялась 25 мм, а его высота составляла 22 мм. Плотность точек электрического контроля при сканировании по цилиндрической поверхности была равна 10х26, по торцевой поверхности – 16х30. В целях более точного определения координат дефектов при построении объемного изображения было применено двойное сканирование выделенных участков наплавки с номерами №10 и №11 и специальная компьютерная программа. Задача заключалась в построении объемного изображения непровара по результатам сканирования.

В общем случае при электрическом контроле может использоваться дополнительно [2,3]:

– внешнее электрическое и/или магнитное поле;

– тепловой нагрев объекта контроля;

– внешнее электрическое или магнитное поле и нагрев объекта контроля одновременно.

Электрический контроль может проводиться также с использованием микрозондовых преобразователей с минимальным шагом сканирования. Для повышения эффективности контроля на практике применяются мультиметры с более высокой чувствительностью, например, с порогом чувствительности в несколько нановольт.

Описание метода и результаты построения объемного изображения дефектов

При распространении волн в средах, интенсивно поглощающих энергию, с удалением от источника происходит их постепенное затухание [4]. В металлах распространение волн механических напряжений (ВМН) сопровождается интерференцией и дифракцией [5]. В результате чего распределение потенциалов на поверхности изменяется, а на потенциограммах образуются разнообразные по форме и размерам рефлексы. Современные инструменты компьютерного дизайна позволяют окрашивать рефлексы в разные цвета, в соответствии со значениями амплитуды сигнала, что повышает наглядность представления результатов и дает важную дополнительную информацию (рис. 1).

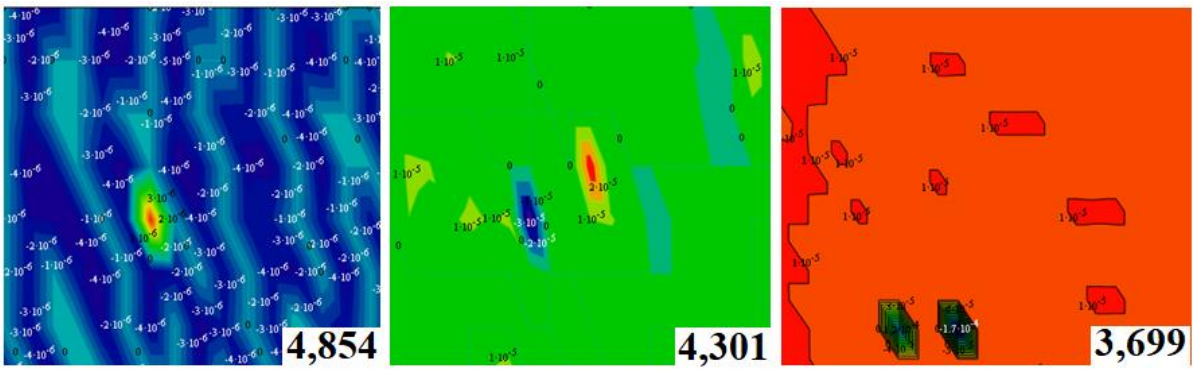


Рисунок 1. Фрагменты поверхностных потенциограмм с рефлексами от следующих дефектов (слева направо): зародыш микроскопической трещины; сингулярность в сварном соединении; шлаковое скопление в сварном соединении

Figure 1. Fragments of surface potentiograms with reflections from the following defects (from left to right): the nucleus of a microscopic crack; singularity in a welded joint; slag accumulation in a welded joint

Затухание, связанное с поглощением механической энергии, заметно проявляется в массивных образцах и сварных соединениях толщиной 50 мм и более[1].

На потенциограммах также наблюдается эффект экранирования изображений дефектов, находящихся в разных объемных слоях металла и излучающих волны различной амплитуды. Изображения на высоких уровнях фиксации экранируются изображениями дефектов низких уровней. Этот эффект продемонстрирован на рисунке 2.

[1] Электрофизический неразрушающий контроль сварных швов парогенератора ПГВ 1000 в Ресурсном центре НИЯУ МИФИ на площадке АЭМ-технологии Атоммаш в г. Волгодонске / В.Г. Бекетов, А.Е. Дембицкий, В.В. Кондаков, В.И. Сурин, З.С. Волкова, А.А. Абу Газал, А.И. Алвахеба и др. // Отчет о НИОКТР, НИЯУ МИФИ, 2017, регистрационный номер АААА-А19-119032190046-8, 118 с.

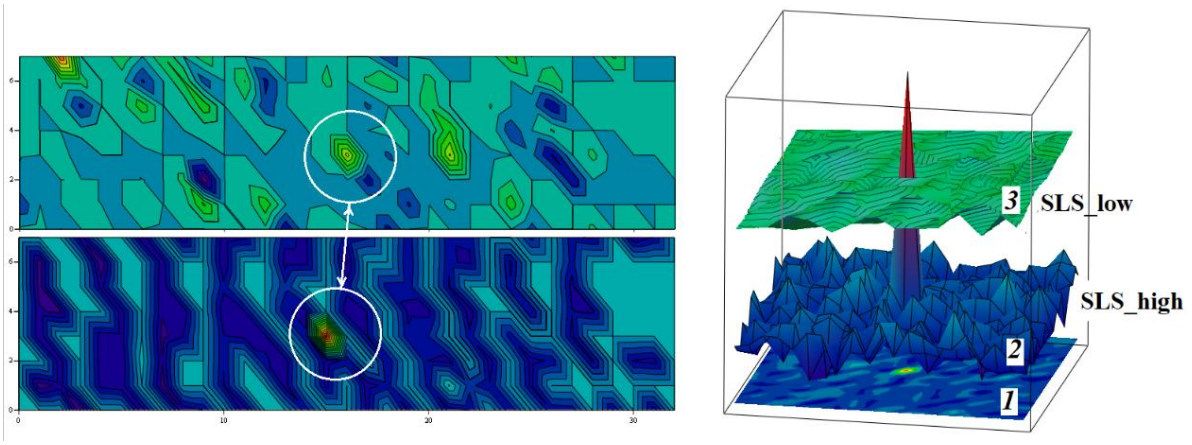


Рисунок 2. Эффект самоэкранирования дефектов на разных структурных уровнях: слева – поверхностные потенциограммы с рефлексом зародыша трещины на уровне фиксации SLS=2 (вверху) и SLS=4,854 (внизу); справа – 1) потенциограмма с зародышем трещины, 2) объемная потенциограмма данного дефекта на высоком уровне фиксации, 3) объемная потенциограмма данного дефекта на низком уровне фиксации

Figure 2. The effect of defect self-shielding at different structural levels: on the left - surface potentiograms with a crack-nucleus reflection at the fixation level SLS=2 (top) and SLS=4.854 (bottom); on the right - 1) potentiogram with a crack nucleus, 2) volumetric potentiogram of this defect at a high fixation level, 3) volumetric potentiogram of this defect at a low fixation level

С левой стороны рисунка 2 видно, что на низком уровне фиксации для SLS=2 зародыш трещины, выделенный в белый круг, однозначно идентифицировать сложно, поскольку на потенциограмме присутствуют похожие по размерам, форме и цвету рефлексы. На высоком же уровне фиксации для SLS=4,854 координаты зародыша трещины определяются однозначно [6].

На рисунке 3 показаны примеры трех видов взаимного самоэкранирования неоднородностей: полное, частичное и условное. Экранирование обусловлено взаимным пространственным перекрытием областей излучения волн упругих напряжений (деформаций) или областей Сен-Венана. Частичное перекрытие (или частичное наложение рефлексов на потенциограммах) легко определяется по их цветовой гамме и расположению. Область условного экранирования на потенциограммах бывает окружена темной замкнутой линией, разделяющей изопотенциальные участки потенциограммы. Такой же внешний контур имеют и одиночные рефлексы. Контурное выделение рефлексов и другие функции визуализации регулируется параметрами программы для обработки изображений.

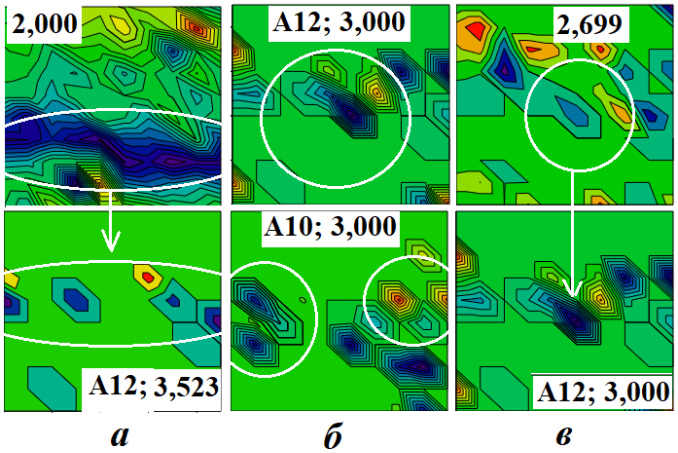


Рисунок 3. Примеры полного (а), частичного или перекрывающего (б) и условного (в) экранирования неоднородностей

Figure 3. Examples of full (a), partial or overlapping (b) and conditional (c) screening of inhomogeneities

Интерференционные эффекты наблюдаются в том случае, когда излучение подповерхностных дефектов имеет высокую спектральную плотность мощности и поэтому проявляются в широком интервале уровней фиксации. Несколько отдельных дефектов с высокой спектральной плотностью мощности создают на поверхности один общий рефлекс, как правило, протяженный по форме с глубоким насыщенным цветом. Наиболее сложный случай разделения дефектов по глубине возникает при близком расположении источников, имеющих близкие значения мощности излучения.

Сформулированы и реализованы методические рекомендации для построения объемных изображений дефектов. Координаты дефектов в объеме определяются графически по результатам следующих измерений:

– двойного сканирования поверхностей объекта контроля;

– двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля;

– двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля с применением синхронизатора излучений по времени или по частоте.

В случае сканирования по одной (внешней или внутренней) поверхности координаты дефектов определяются координатами соответствующих поперечных сечений и расчетными значениями их глубины.

Полученные результаты двойного сканирования анализируются на разных уровнях фиксации. Для этого также применяются методы частотно-временного анализа и интегральное преобразование Фурье [7].

Виды дефектов определяется следующими способами:

–расчетом полей упругих напряжений внутри области Сен-Венана;

–методом частотно-временного анализа и преобразованием Фурье;

–оценкой влияние эффекта экранирования;

–расчетом функции спектральной плотности мощности;

–анализом геометрических размеров области Сен-Венана, а также формы и других параметров;

–итоговым сопоставлением новых потенциограмм с архивными данными лаборатории ФЭДНК ИЯФиТ [8,9].

Причина возникновения и распространения ВМН связана с релаксацией внутренних напряжений в объеме образца. Упругие волны воздействуют на поверхность контакта и вызывают локальные упругие смещения среды. Как правило, такие процессы на временной зависимости амплитуды сигнала регистрируются преобразователем в виде δ – функций и характеризуются высокими значениями амплитуды. Процессы, приводящие к деформационному упрочению, связаны с движением дислокаций. В этом случае часть образовавшихся дислокаций достигает поверхности образца, образуя на ней дислокационные ступеньки. Ступеньки взаимодействуют с поверхностью преобразователя, увеличивая число и площадь пятен электрического контакта. Чем активнее протекают деформационные процессы, тем более заметный по амплитуде сигнал будет сформирован на выходе электрофизического преобразователя.

В соответствии с теоремой Парсеваля [10], мощность источника внутренних механических напряжений определяется интегральной функцией $E_{mech,}$ формула (1):

$$E_{mesh} = \int_{t_1}^{t_2} (\Delta\varphi(t))^2 dt. \quad (1)$$

Значение функции пропорционально той части механической энергии, которая поглощается электронной системой. Поглощенная электронами энергия влияет на локальную работу выхода и интенсифицирует процессы электронных переходов между металлами. Разделив правую часть выражения (1) на величину временного интервала Δt

($\Delta t = t_2 - t_1$), обычно равного времени измерения, получим другую характеристику для источников ВМН – *W*, формула (2):

$$W = \frac{1}{\Delta t}\int_{t_1}^{t_2}(\Delta\varphi(t))^2 dt. \quad (2)$$

Согласно следствию теоремы Парсеваля величина *W* есть средняя мощность чисто резистивной нагрузки, численно равной 1 Ом, к концам которой приложено электрическое напряжение $\Delta\varphi$. В методе СКП напряжение $\Delta\varphi$ представляет собой дифференциальную контактную разность потенциалов, зависящую от работы выхода электронов.

В таблице 1 показаны значения мощности источников, рассчитанные по формуле (2). Приведенные в таблице данные подтверждаются сравнением и идентификацией дефектов другими методами неразрушающего контроля.

Таблица 1. Значения мощности источников ВМН в зависимости от уровня фиксации дефекта
Table 1. Power values of mechanical stress wave sources depending on the defect fixation level

Уровень фиксации	Мощность, Вт	Примеры источников
0	1	Точечная поверхностная коррозия, следы механической обработки поверхности
1	10^{-2}	Проникающая коррозия, поверхностные и объемные дефекты
2	10^{-4}	Стенки отверстий и канавки фрезеровки в металлах после механического сверления и фрезерования; очаги усталостного разрушения в объеме
3	10^{-6}	Очаги механических разрывов и усталостного разрушения
4	10^{-8}	Зародышевые трещины, непровары
5	10^{-10}	Зоны образующегося мартенсита, фазовые переходы, зародышевые трещины, полосы Чернова-Людерса
6	10^{-12}	Спаренные дефекты, скопления и кластерные образования
7	10^{-14}	Отдельные, глубокорасположенные в объеме дефекты

Для расчета коэффициента экранирования электрического сигнала K_{sc} в единицах децибел, получено выражение (3) [11]:

$$K_{sc} = 10\ lg\left(\frac{\varphi_1}{\varphi_2}\right)^2, \quad (3)$$

где φ_1 – амплитуда электрического сигнала до экрана, φ_2 – амплитуда электрического сигнала после экрана.

Для рисунка 3 коэффициенты экранирования электрического сигнала K_{sc} соответственно равны 23,4 (*а*) и 1,0 (*в*). Для случая *б* отсутствует взаимное экранирование рефлексов и поэтому K_{sc} близко к нулевому значению. На рисунке 2 приведен пример условного экранирования.

Как было показано авторами данной статьи в опубликованной ранее работе «Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении» [1], линии непровара в наплавке наиболее отчетливо видны на потенциограммах у основания наплавки, полученных для цилиндрической поверхности участка № 11 на уровнях фиксации, начиная с SLS=4 (рис. 4). Рефлексы на потенциограммах указывают на частичный непровар, допущенный сварщиком при послойном наплавлении металла. При этом образуются локальные участки отдельных непроваров, три из которых наиболее заметны на потенциограмме (SLS=3,523). При их детальном изучении можно сделать вывод, что протяженный при сканировании по цилиндрической поверхности рефлекс состоит из

отдельных частей. На разной глубине наблюдается три локальных непровара в интервале SLS=4,699 – 5,26.

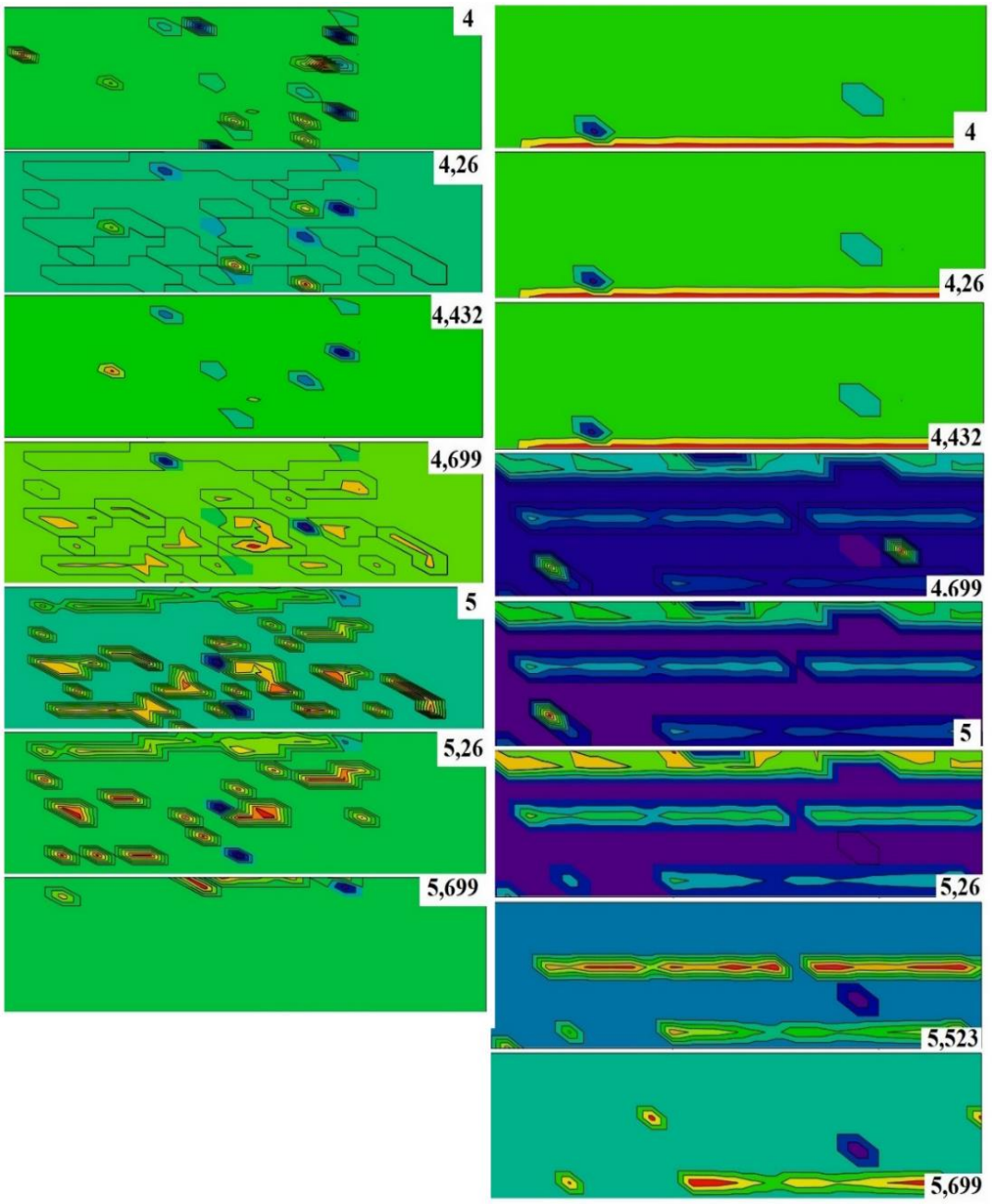


Рисунок 4. Потенциограммы трубы с наплавкой: слева – сканирование по торцевой поверхности, справа – сканирование по цилиндрической поверхности
Figure 4. Welded pipe potentiograms: on the left - scanning along the end surface, on the right - scanning along the cylindrical surface

Наиболее заметный по уровню мощности излучения непровар располагается в нижней части наплавки (W= 10^{-8} Вт). Непровар, который на уровне фиксации SLS=4 (рис. 4) представляет собой тонкую протяженную полосу (рефлекс красного цвета), на более высоких уровнях фиксации вследствие эффекта условного экранирования трансформируется в несколько локальных непроваров (SLS=5,699).

На рисунке 6 приведен пример объемного представления непровара по толщине трубы с наплавкой в представлении поверхностных потенциалов на разных уровнях фиксации. Изображение построено с помощью результатов (рис. 5), полученных с шагом амплитудного дискриминатора, равного 10^{-6} В.

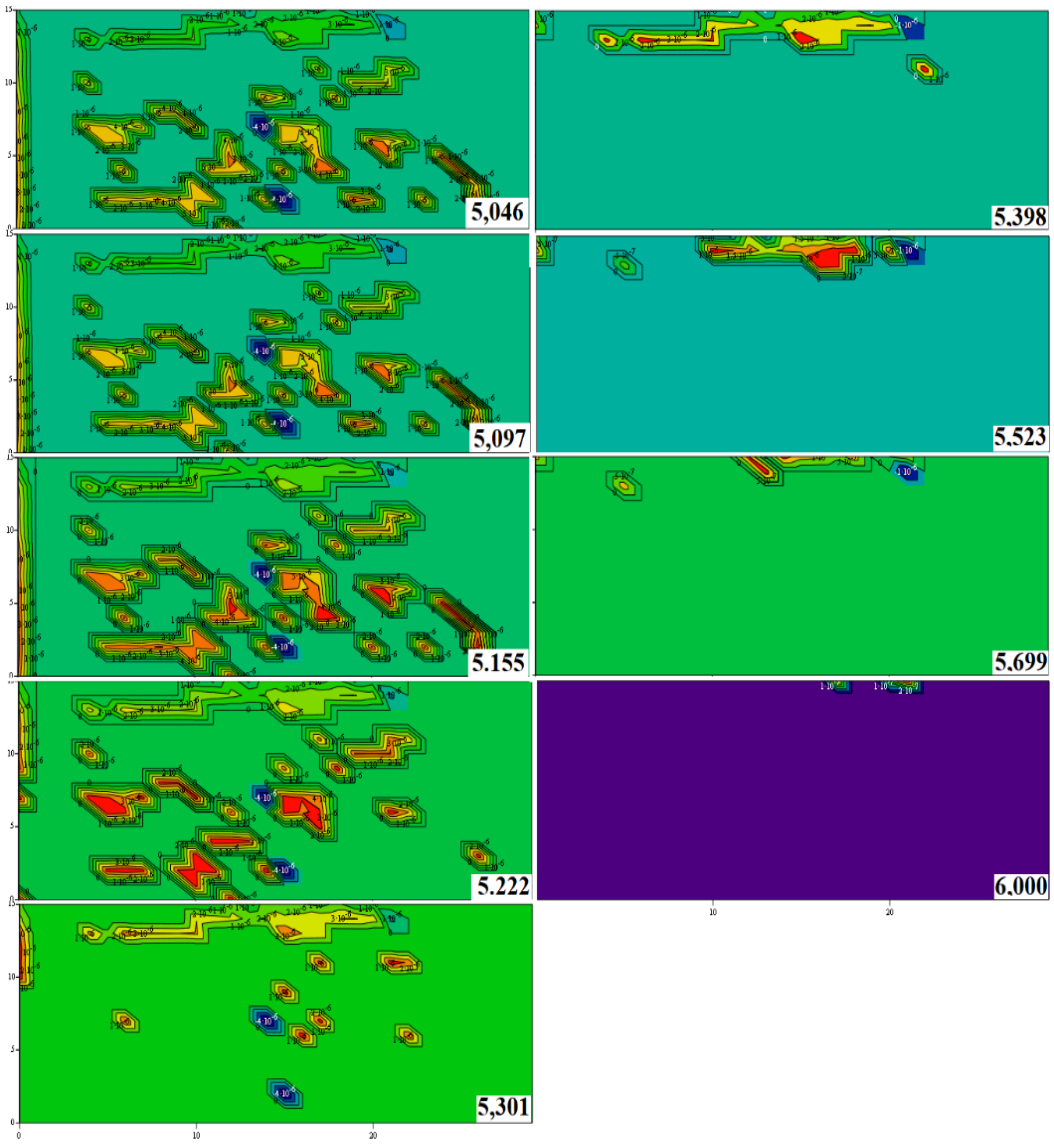


Рисунок 5. Детализация дефектов сварного соединения на участке №11 по результатам сканирования торцевой поверхности
Figure 5. Detailing of defects in the welded joint in section No. 11 based on the results of scanning the end surface

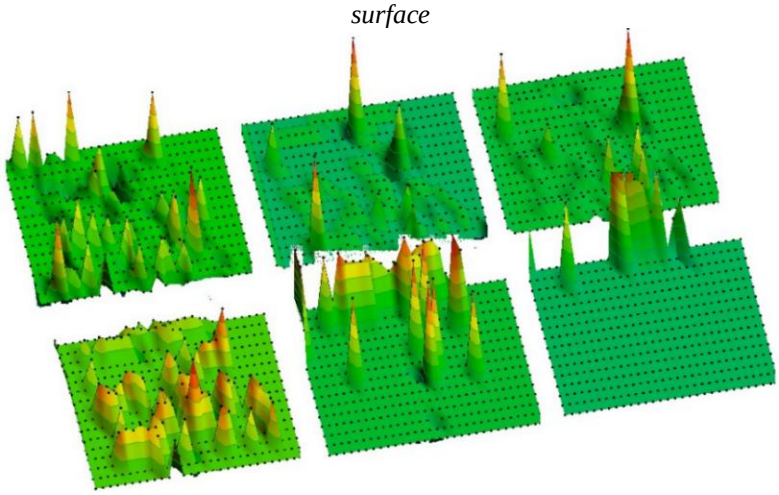


Рисунок 6. Объемное представление непровара по толщине трубы с наплавкой «И», №5, АМ 117.03.02.540 в представлении поверхностных потенциалов при разных уровнях фиксации: верхний ряд слева направо SLS – 2.523, 3.699, 4.000; нижний ряд – 4.509, 5.301, 5.699
Figure 6. Volumetric representation of lack of penetration across the thickness of the pipe with surfacing "I", No. 5, AM 117.03.02.540 in the representation of surface potentials at different levels of fixation: top row from left to right SLS - 2.523, 3.699, 4.000; bottom row - 4.509, 5.301, 5.699

Заключение

Метод электрофизической хроматографии позволяет представлять поверхностные и внутренние объемные дефекты в металлах с высоким пространственным разрешением.

Приведен пример объемного представления непровара по толщине заводской трубы с наплавкой «И», №5, АМ 117.03.02.540 в представлении поверхностных потенциалов на разных уровнях фиксации.

Сформулированы и реализованы методические рекомендации для построения объемных изображений дефектов. Локация дефектов в объеме осуществляется по результатам следующих измерений:

- двойного сканирования поверхностей объекта контроля;
- двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля;
- двойного одновременного сканирования поверхностей объекта контроля с применением синхронизатора излучений по времени и/или по частоте.

Установлено три вида самоэкранирования неоднородностей в объеме металла: полное, частичное и условное. Экранирование обусловлено взаимным пространственным перекрытием областей, излучающих волны упругих напряжений (деформаций). Частичное перекрытие или частичное наложение рефлексов на потенциограммах определяется по их цветовой гамме и расположению. Область условного экранирование на потенциограммах, как правило, окружена замкнутой линией, разделяющей изопотенциальные участки потенциограммы. Контурное выделение рефлексов и другие функции визуализации можно регулировать параметрами программы для обработки изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А. и др. Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении. *Глобальная ядерная безопасность.* 2023;(1):36–53. https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-04

2. Сурин В.И., Волкова З.С., Денисов Р.А., Мотовилин В.Д., Рейн Н.В. Методы электрофизической диагностики и контроля реакторного оборудования. *Глобальная ядерная безопасность.* 2016;(4):51–62. URL: https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2016.4.pdf (дата обращения: 10.03.2023)

3. Абу Газал А.А., Сурин В.И., Шеф Е.А., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В. Автоматизация электрофизической диагностики при физико-механических испытаниях материалов. *Автоматизация в промышленности*. 2019;(2):48–51. https://doi.org/10.25728/avtprom.2019.02.11

4. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. Москва : Издательство стандартов; 1976. 272 с.

5. Алвахеба А. И., Сурин В.И., Бекетов В.Г., Иванов О.В., Иванова Т.Е. Сравнительный анализ результатов радиографического и электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений модельных образцов. В кн.: *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2018): Труды XVIII Международной молодежной конференции.* Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2018. С. 179-180. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36979736_11029641.pdf (дата обращения: 10.03.2023). EDN: YXJYAH

6. Сурин В.И., Польский В.И., Осинцев А.В., Джумаев П.С. Применение метода сканирующей контактной потенциометрии для регистрации образования зародышевой трещины в сталях. *Дефектоскопия.* 2019;(1):53–60. https://doi.org/10.1134/S0130308219010008l

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. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052061

8. Морозов А.А., Сурин В.И., Батухтин Е.А., Зорина Т.Н. Информационное обеспечение электрофизического метода исследования поверхности материалов. *Информационные технологии в проектировании и производстве.* 2011(3):59–65. URL: http://izdat.ntckompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=159CachedSimilar%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B2&ELEMENT_ID=7943 (дата обращения: 10.03.2023)

9. Surin V.I., Evstyukhin N.A., Kapralov Yu.A., Morozov A.A. High-effective control system for reactor technological equipment. *Nuclear Energy for New Europe 2010. Book of Abstracts. Slovenia;* 2010. P. 58-59. URL: https://arhiv.djs.si/port2010/htm/abs/absPORT20102754.html (дата обращения: 10.03.2023)

10. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов : Перевод с англ. Москва: Связь; 1980. 248 с.

11. Сурин В.И., Бокучава Г.Д., Папушкин И.В. Исследование очагов деформационного упрочнения в сплаве Д16Т на дефектах механической обработки поверхности. *Информационные технологии в проектировании и производстве.* 2022;(1):34–44.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Сурин В.И. – научное руководство проектом, участие в экспериментах;

Щербань А.С. – разработка методической части исследований, организация экспериментальных работ и участие в них;

Щербаков А.А. – обработка и анализ экспериментальных данных, подготовка заключения и результатов исследования к опубликованию;

Иваний М.Б. – анализ экспериментальных данных, подготовка заключения и текста научной статьи к опубликованию;

Жидков М.Е. – общее руководство и планирование исследования, подготовка и согласование заключения;

Томилин С.А. – информационное обеспечение научного исследования, подготовка и опубликование результатов исследования;

Козлов А.В. – ресурсное обеспечение экспериментального исследования, подготовка и опубликование результатов исследования.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Surin V.I. – scientific management of the project, participation in experiments;

Shcherban A.S. – development of the methodological part of research, organization of experimental work and participation in them;

Shcherbakov A.A. – processing and analysis of experimental data, preparation of the conclusion and results of the study for publication;

Ivany M.B. – analysis of experimental data, preparation of a conclusion and text of a scientific article for publication;

Zhidkov M.E. – general management and planning of the study, preparation and approval of the conclusion;

Tomilin S.A. – information support of scientific research, preparation and publication of research results;

Kozlov A.V. – resource support for experimental research, preparation and publication of research results.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Виталий Иванович Сурин, к.т.н., заведующий лабораторией функциональной электрофизической диагностики и неразрушающего контроля института ядерной физики и технологий (ИЯФиТ), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6153-0206 ; e-mail: VISurin@mephi.ru

Александр Сергеевич Щербань, начальник отдела методов неразрушающего контроля, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0009-0004-8619-4455 ; e-mail: shcherban_as@atommash.ru

Александр Антонович Щербаков, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1313-8829 ; e-mail: AAShcherbakov@mephi.ru

Михаил Борисович Иваний, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9574-9165 ; e-mail: MBIvanyi@mephi.ru

Максим Евгеньевич Жидков, директор филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; e-mail: zhidkov_me@atommash.ru

Сергей Алексеевич Томилин, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vitaly I. Surin, Cand. Sci. (Eng.), Head of Functional Electrophysical Diagnostics and Non-Destructive Testing Laboratory, Institute of Nuclear Physics and Technology (INPhT), National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-6153-0206 ; e-mail: VISurin@mephi.ru

Alexander S. Shcherban, Head of Non-Destructive Testing Department, «Atommash» the branch of JSC «AEM-Technologies», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0009-0004-8619-4455 ; e-mail: shcherban_as@atommash.ru

Alexander A. Shcherbakov, graduate student, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1313-8829 ; e-mail: AAShcherbakov@mephi.ru

Mikhail B. Ivanyi, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1313-8829 ; e-mail: MBIvanyi@mephi.ru

Maxim E. Zhidkov, Head of the Atommash branch of AEM-technologies JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; e-mail: zhidkov_me@atommash.ru

Sergey A. Tomilin, Cand. Sci. (Eng.), Head and Associate Professor Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical

институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8661-8386 ; e-mail: SATomilin@mephi.ru

Александр Викторович Козлов, директор по производству, Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; e-mail: kozlov_av@atommash.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023
После доработки 22.05.2023
Принята к публикации 30.05.2023

Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8661-8386 ; e-mail: SATomilin@mephi.ru

Alexander V. Kozlov, Head of Production, «Atommash» the branch of JSC «AEM-Technologies», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; e-mail: kozlov_av@atommash.ru

Received 27.03.2023
Revision 22.05.2023
Accepted 30.05.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING COMMISSIONING OF EQUIPMENT NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 532.5:621.039.5
DOI 10.26583/gns-2023-02-06
EDN ZBQFNI

Прогнозирование результатов испытаний по определению коэффициента гидравлического сопротивления клапана обратного осесимметричного

С.А. Кузин [1] ✉, С.Б. Кравец [2]

[1]АО «Атоммашэкспорт»; Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия
[2]ФБУ «Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия
✉ *KuzinSergey55@mail.ru*

Аннотация. Актуальность данной работы определена необходимостью прогнозировать результаты испытаний по определению коэффициента гидравлического сопротивления клапана обратного осесимметричногоDN100-600, с рабочим давлением до 20 МПа и рабочей температурой от плюс 5^0С до плюс 350^0С по ТУ 6981-254-08847871-07. В данной работе предлагается снизить объем испытаний, исключив испытания для промежуточных образцов клапанов (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600), расположенными по DN между типовыми образцами клапанов (DN 100, DN175, DN 400), заменив испытания проведением расчетов в программном модуле ANSYS CFX расчетного комплекса ANSYS. Приведены результаты испытаний по определению коэффициента гидравлического сопротивления. Предложена оценка величины коэффициента гидравлического сопротивления и разработаны рекомендации по его определению. Экспериментальное определение гидравлических характеристик проводилось в области квадратичного сопротивления и при отсутствии кавитации (испытания проводились на воде).Для клапана обратного номинальных диаметров DN ≤ 250 область квадратичного сопротивления наступает при числах Рейнольдса Re ≥ 2 × 104.Для арматуры номинальных диаметров DN ≥ 250 область квадратичного сопротивления ReKB определяют в процессе экспериментального определения коэффициентов сопротивления и пропускной способности. Порядок определения ReKB изложен в 7.2.3 ГОСТ 55508-2013. Данные результаты испытаний на определение коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07 можно использовать при разработке программ приемочных испытаний для установления количества образцов, подвергаемых испытаниям в зависимости от конструктивных особенностей и количества исполнений клапанов обратных (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600), заменив испытания расчетами.

Ключевые слова: коэффициент гидравлического сопротивления, клапан обратный осесимметричный, число Рейнольдса, рабочее давление, рабочая температура.

Для цитирования: Кузин С.А., Кравец С.Б. Прогнозирование результатов испытаний по определению коэффициента гидравлического сопротивления клапана обратного осесимметричного. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):50–56. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-06

Prediction of test results to determine the hydraulic resistance coefficient of an axially symmetrical check valve

Sergey A. Kuzin [1], Sergey B. Kravets [2]

[1]JSC «Atommashexport», Volgodonsk, Rostov region, Russia
[2]Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Moscow, Russia

Abstract. The urgency of the paper is determined by the necessity to predict the results of tests for determining the coefficient of hydraulic resistance of axially symmetrical check valve DN 100-600 with operating pressure

© Кузин С.А., Кравец С.Б., 2023

up to 20 MPa and operating temperature from plus 50C to plus 3500C according to TS 6981-254-08847871-07. This paper suggests to reduce the volume of tests by excluding the tests for intermediate samples of valves (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600) situated in DN between the valve type models (DN 100, DN 175, DN 400) and replaced the tests by calculations in the programme module ANSYS CFX of the calculation complex ANSYS. The results of the tests for determining the coefficient of hydraulic resistance are given. An estimate of hydraulic resistance coefficient values is offered and recommendations for its determination are given. The experimental determination of hydraulic characteristics was carried out in the region of quadratic resistance and in absence of cavitation (the tests were done on water). The region of quadratic resistance comes at Reynolds numbers Re ≥ 2 × 104 for check valve of nominal diameters DN ≤ 250. The region of quadratic resistance ReKB is determined in the process of experimental determination of drag and flow capacity factors for valves of nominal diameters DN ≥ 250. The procedure of determination of ReKB is described in 7.2.3 of GOST 55508-2013. These test results for determination of hydraulic resistance coefficient for valves DN 150, DN 175, DN 400 according to TU 6981-254-08847871-07 can be used when developing acceptance test programs to set the number of tested samples according to the design features and number of versions of check valves (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600), replacing the testing by calculation.

Keywords: drag coefficient, axially symmetrical check valve, Reynolds number, working pressure, working temperature.

For citation: Kuzin S.A, Kravets S.B. Prediction of test results to determine the hydraulic resistance coefficient of an axially symmetrical check valve. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):50-56 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-06

Введение

В настоящее время в различных системах энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 широко используются клапаны обратные осесимметричные DN100-600, с рабочим давлением до 20 МПа и рабочей температурой от плюс 5^0C до плюс 350^0C по ТУ 6981-254-08847871-07. Эскиз арматуры приведен на рисунке 1.

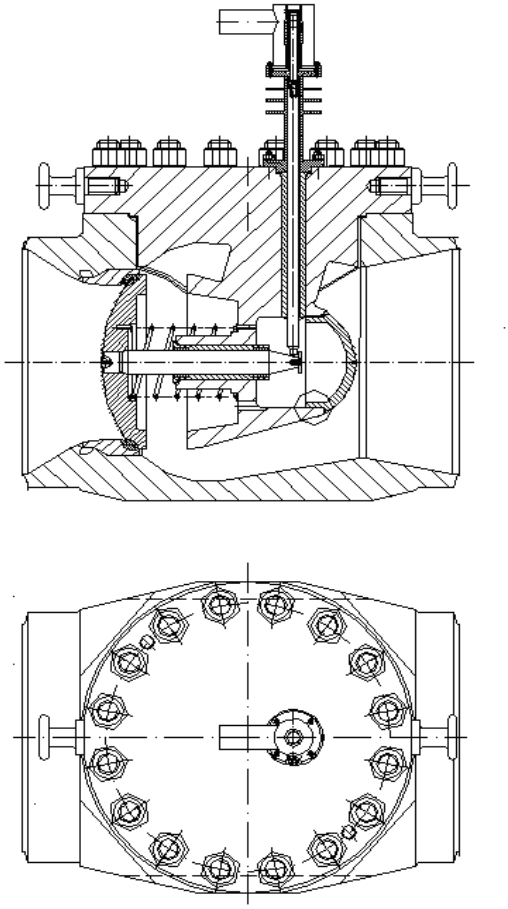


Рисунок 1. Клапана обратные осесимметричные DN100-600
Figure 1. Axially symmetrical check valves DN100-600

В соответствии с действующими на арматуру для АЭС нормативно-техническими документами[1] клапаны обратные осесимметричные должны подвергаться приемочным испытаниям, которые включают в себя определение коэффициента гидравлического сопротивления клапана. Испытания проводятся в соответствии с Методикой экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик арматуры трубопроводной (для конструктивно подобных обратных осесимметричных клапанов АО «НИЦ АЭС» были проведены испытания с определением коэффициента гидравлического сопротивления по ГОСТ Р 55508-2013).

В данной работе предлагается снизить объем испытаний, исключив испытания для промежуточных образцов клапанов (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600), расположенны по DN между типовыми образцами клапанов (DN 100, DN175, DN 400), заменив испытания проведением расчетов в программном модуле ANSYS CFX расчетного комплекса ANSYS[2].

Параметры среды клапана и окружающей среды представлены в таблице 1. Результаты экспериментального определения коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов обратных осесимметричных, изготавливаемых по ТУ 6981-254-08847871-07, приведены в таблице 2.

Таблица 1. Параметры среды клапана и окружающей среды
Table 1. Valve medium and ambient parameters

Параметры	Величина
Температура испытательной среды, ºС	20±15
Температура окружающего воздуха, ºС	20±25
Атмосферное давление, кПа	от 84,0 до 106,7
Рабочая среда	вода

Таблица 2. Результаты определения коэффициента гидравлического сопротивления
Table 2. Results of the determination of the hydraulic resistance coefficient

№ п/п	Обозначение клапана	P, МПа	Коэффициент гидравлического сопротивления клапана		№ Протокола испытаний АО «НИЦ АЭС»
			Расчетный	Экспериментальный	
1	DN 400	9,0	2,94	3,253	№306 от 30.06.2010
2	DN 175	16,0	2,55	2,5	№255 от 11.04.2008
3	DN 150	4,0	3,4	3,619	№966 от 11.06.2018

Экспериментальное определение гидравлических характеристик проводилось в области квадратичного сопротивления и при отсутствии кавитации (испытания проводились на воде). Для клапана обратного номинальных диаметров DN ≤ 250 область квадратичного сопротивления наступает при числах Рейнольдса $Re \geq 2 \times 10^4$. Для арматуры номинальных диаметров DN ≥ 250 область квадратичного сопротивления $Re_{КВ}$ определяют в процессе экспериментального определения коэффициентов

[1] Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Основные положения НП-001-15.URL: http://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciiy.html; Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования» НП-068-05. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200044037; Состав и объем испытаний специальной трубопроводной арматуры и приводов для атомных станций. Методические указания МУ 1.2.3.07.0057-2018. URL: https://standartgost.ru/g/МУ_1.2.3.07.0057-2018/;Арматура трубопроводная. Методика гидравлического расчета обратных клапанов и затворов. СТ ЦКБА 117-2017. URL: https://www.normacs.ru/doclist/doc/11QKt.htm/; ГОСТ Р 55508-2013 Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик.Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2014.

[2] Расчетный комплекс ANSYS CFX, лицензия № 1070122 (в настоящее время широко используемый программный комплекс для решения гидравлических расчетов оборудования для АЭС).

сопротивления и пропускной способности. Порядок определения $Re_{КВ}$ изложен в 7.2.3 ГОСТ 55508-2013.

В соответствии с п.5.9 ГОСТ Р 55508-2013 длина прямых отрезков сменных трубопроводов стенда должна быть не менее двадцати номинальных диаметров на входе арматуры и не менее десяти номинальных диаметров на выходе, как указано для участка стенда испытания арматуры с патрубками на одной оси на рисунке 2.

Испытания были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55508-2013, по ним были оформлены протоколы, указанные в таблице 2.

Для сравнения результатов экспериментального определения коэффициента гидравлического сопротивления клапанов с существующими расчетными методами были проведены серии расчетов в программном модуле ANSYS CFX, и выполнены попытки оценить возможность проведения расчетов данной арматуры методами, изложенными в Методике гидравлического расчета обратных клапанов и затворов арматуры трубопроводной (СТ ЦКБА 117-2017) и в Справочнике по гидравлическим сопротивлениям И.Е. Идельчика [1]. К сожалению, эти методы оценки коэффициента гидравлического сопротивления не подходят для клапанов обратных осесимметричных DN100-600 по ТУ 6981-254-08847871-07 из-за сложной формы внутреннего профиля клапанов и наличия дополнительного гидравлического сопротивления в месте продлена расчетная область.

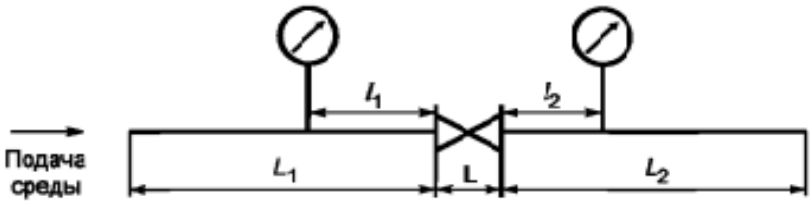


Рисунок 2. Участок стенда для испытания арматуры с патрубками на одной оси в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55508-2013
Figure 2. Valve test bench section with spigots on one axis in accordance with the requirements of STATE STANDARD P 55508-2013 R 55508-2013

Трехмерная геометрическая и конечно-элементная модели проточной части клапана изображены на рисунках 3 и 4. Приводится модель, использующая условие симметрии.

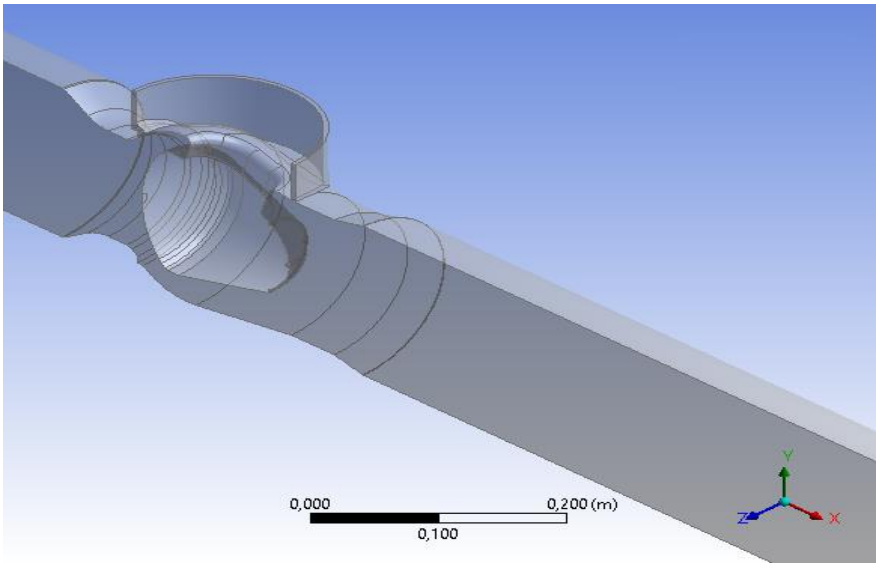


Рисунок 3. Геометрическая модель проточной части
Figure3. Geometric model of the flow part

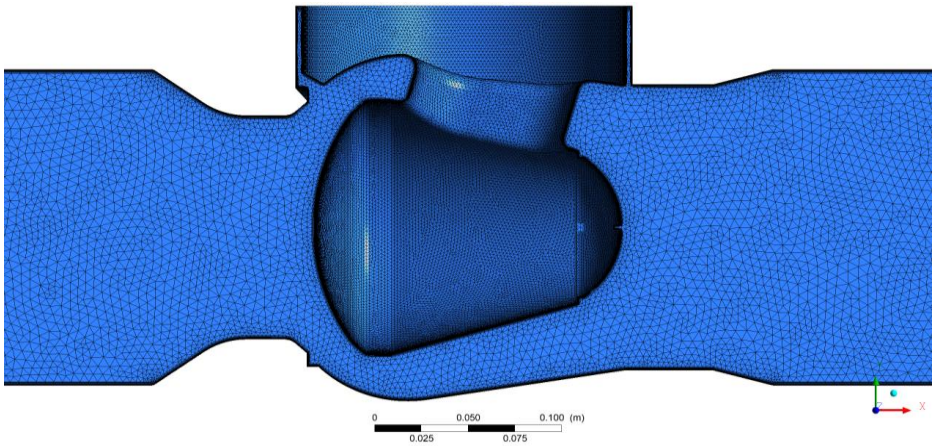


Рисунок 4. Конечно-элементная модель проточной части клапана
Figure 4. Finite element model of the valve flow area

Движение вязкой сжимаемой жидкости описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, представляющих собой законы сохранения массы и импульса для сплошной среды [1-7], в данном случае для изометрической задачи.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления при проектировании клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07 были проведены серии расчетов в программном модуле ANSYS CFX расчетного комплекса ANSYS.

Согласно ГОСТ Р 55508-2013, длина прямых отрезков сменных трубопроводов стенда должна быть не менее двадцати номинальных диаметров на входе арматуры и не менее десяти номинальных диаметров на выходе, таким образом, продлена расчетная область. При подготовке геометрической модели устранены имеющиеся зазоры и соединительные элементы исходной 3D-модели клапана, не являющиеся необходимыми для учета в расчете. Из твердотельной модели выделена проточная часть, которая и составляет итоговую геометрическую расчетную модель. Проточная часть симметрична относительно вертикальной плоскости, проходящей через крышки, поэтому возможен расчет для одной половины с граничным условием симметрии.

В качестве испытательной среды использовалась модель «Water», обладающая свойствами воды при температуре 20°C. Граничные условия в виде скорости потока прикладывались ко входу в расчетную область модели с учетом числа Рейнольдса, соответствующего области квадратичного сопротивления ($Re > 2 \cdot 10^4$). Математическая модель для описания гидродинамических процессов, происходящих в клапане, состоит из системы уравнений, описывающих стационарное турбулентное движение несжимаемой вязкой жидкости. Для моделирования процессов турбулентного переноса применялась стандартная двухпараметрическая k-w модель для высоких чисел Рейнольдса.

Результатами расчета является распределение давлений и скоростей в клапане. Так как поток среды в клапане при измерении является установившимся, в численном расчете решается стационарная задача.

На торцевой поверхности расчетной модели, соответствующей входному патрубку, задано граничное условие в виде потока среды с постоянной скоростью.

На торцевой поверхности расчетной модели, соответствующей выходному патрубку, задано граничное условие постоянного давления, равного нулю, это физически соответствует открытому патрубку. На всей области, кроме входа и выхода, задается граничное условие в виде стенки (wall).

Численное решение поставленной задачи на математической модели – итерационный процесс, сходимость которого оценивают по величине невязок.

По вертикальной оси откладывается значение переменной расхода в процентах, а по горизонтальной оси – количество итераций.

На рисунке 5 показаны графики изменения невязок от числа итераций для массового расхода. Сходимость достигнута.

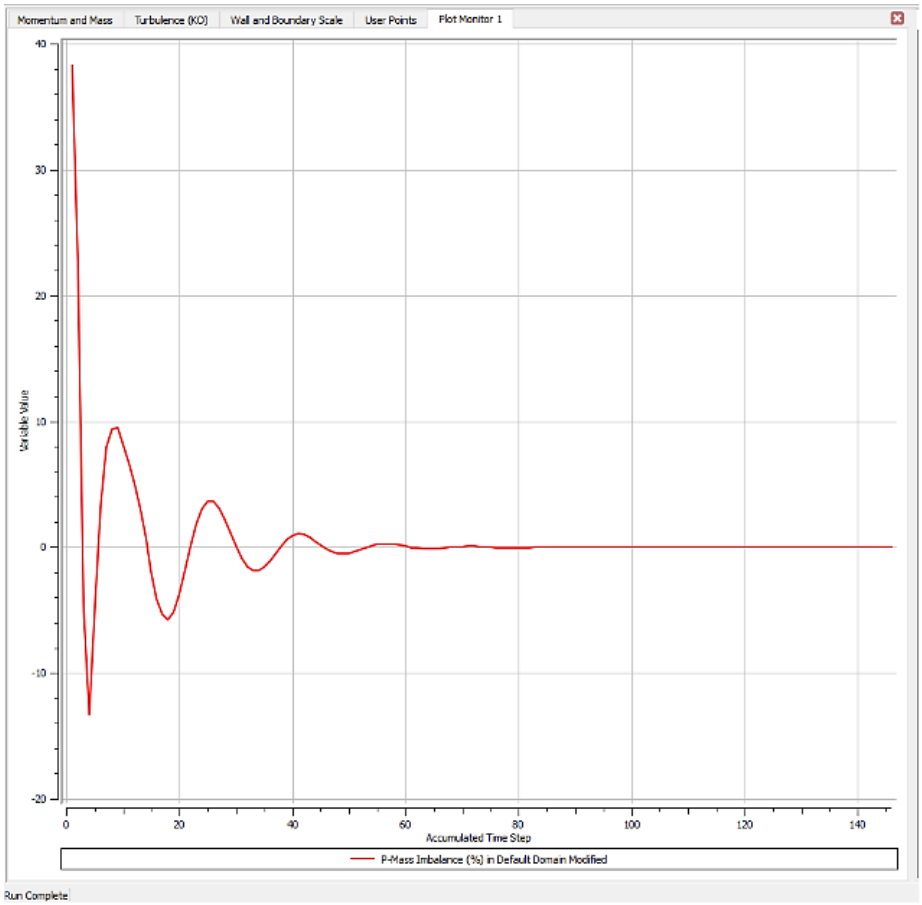


Рисунок 5. Зависимости значений невязок скорости по трем координатам и расхода от числа итераций
Figure 5. Dependencies of the velocity discrepancy values by three coordinates and the flow rate on the number of iterations

Выводы

В работе приведены значения коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07, полученные АО «НИЦ АЭС» и приведенные в таблице 2.

Были проведены расчеты значения коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07 в программном модуле ANSYS CFX расчетного комплекса ANSYS, приведенные в таблице 2.

Значение коэффициента гидравлического сопротивления, определенное в результате численного моделирования, совпадает с результатами эксперимента с точностью до 10%, что позволяет сделать вывод о хорошей точности расчетов и позволяет проводить дальнейшие исследования, будучи уверенными в их достоверности.

Данные результаты испытаний на определение коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07 можно использовать при разработке программ приемочных испытаний для установления количества образцов, подвергаемых испытаниям в зависимости от конструктивных особенностей и количества исполнений клапанов обратных (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600) в соответствии с рекомендациями

(Состав и объем испытаний специальной трубопроводной арматуры и приводов для атомных станций. Методические указания МУ 1.2.3.07.0057-2018. https://standartgost.ru/g/МУ_1.2.3.07.0057-2018/). В соответствии с таблицей 2 НП-068-05 (Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования» НП-068-05. https://docs.cntd.ru/document/1200044037) величина коэффициента гидравлического сопротивления не должна превышать величины 6,0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям: Под редакцией М.О. Штейнберга. Москва: Машиностроение; 1992.672с. URL: https://tehnavigator.ru/Biblioteka/126.pdf (дата обращения: 15.02.2023).

2. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара: Справочник. Москва: Энергоатомиздат; 1984. 80 с.

3. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х томах. Москва: Мир; 1990. 384 с.

4. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: Перевод с англ. Москва: Мир; 1988. 544 с.

5. Chung T.J. Computational fluid dynamics. *Cambridge university press*. 2002:1012. https://doi.org/10.1017/S0022112003005445

6. Rhie C.M., Chow W.L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *AIAA Journal*. 1983;21(11):1525–1532. https://doi.org/10.2514/3.8284

7. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. Москва: Физматлит, 2008. 368 с.

ВКЛАД АВТОРОВ:
Кузин С.А. – анализ результатов испытаний и проведение гидравлических расчетов;
Кравец С.Б. – анализ результатов гидравлических расчетов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Kuzin S.A. – analysis of test results and hydraulic calculations;
Kravets S.B. – analysis of hydraulic calculation results.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

FUNDING:
The study was carried out without external funding sources.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:
No conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Сергей Алексеевич Кузин, ведущий конструктор, АО «Атоммашэкспорт»; к.т.н., 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
Сергей Борисович Кравец, д.т.н., профессор, начальник отдела надежности и качества, ФБУ «Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»; Москва, Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8297-3102 ; e-mail: kravets_sb@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Sergey A. Kuzin, leading designer, JSC Atommashexport; 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

Sergey B. Kravets, Head of Reliability and Quality Department, National Technical Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8297-3102; e-mail: kravets_sb@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023
После доработки 18.05.2023
Принята к публикации 30.05.2023

Received 01.03.2023
Revision 18.05.2023
Accepted 30.05.2023

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.311.25:621.039.5
DOI 10.26583/gns-2023-02-07
EDN BHYMCF

Входные данные для согласования состояний модели и прототипа АЭС с ВВЭР

И.А. Молев, Д.А. Соловьёв ✉, А.Л. Лобарев, Д.А. Плотников, Х.А. Танаш, Е.В. Чернов
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
✉ *vulture@inbox.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены некоторые возможные входные данные модели энергоблока АЭС для решения задачи согласования состояния модели с состоянием прототипа. Важнейшим параметром, используемым для согласования состояний, является тепловая мощность реакторной установки (РУ). Были рассмотрены способы точной установки мощности РУ в модели, а именно, использование автоматического регулятора мощности (АРМ) и математического борного регулятора. В ходе работ по согласованию состояния модели АЭС с прототипом был проведен численный эксперимент с использованием полномасштабного моделирующего комплекса «ПРОСТОР». Суть его заключалась в получении стационарных состояний модели с мощностью от 94% до 104% с шагом 0,05%. Для моделирования использовались данные 3 загрузки 4 блока Калининский АЭС на 248 эффективные сутки. При анализе результатов численного эксперимента были обнаружены два эффекта. Один из них, выраженный в изломе производной полученного графика зависимости давления в ПГ от мощности, связан с достижением верхней границы возможности регулирования давления в ГПК. Исполнительным механизмом регулятора давления в ГПК являются регулирующие клапаны на турбогенераторе. В момент излома графика они открываются на 100%, чем обуславливается дальнейшая невозможность регулирования давления. Давление в ГПК начинает расти. Этот эффект соответствует реальным процессам, происходящим на АЭС. При этом в качестве одного из параметров настройки модели предлагается использовать адаптивный коэффициент к концентрации борной кислоты в реакторе, для управления которым предлагается использовать математический борный регулятор. Вторым эффектом является невозможность точного управления давлением в реакторе из-за особенностей работы автоматики ТЭН КД. В связи с этим предложено использовать дополнительный математический регулятор управления ТЭН КД для согласования состояния модели с прототипом. Данные регуляторы успешно опробованы в составе программного комплекса «ПРОСТОР» для согласования мощности РУ модели и прототипа.

Ключевые слова: борный регулятор, регулятор давления, реактор, ВВЭР, ПРОСТОР, ТЭН КД, прототип.

Для цитирования: Молев И.А., Соловьёв Д.А., Лобарев А.Л., Плотников Д.А., Танаш Х.А., Чернов Е.В. Входные данные для согласования состояний модели и прототипа АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):57–65. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-07

Input data to match model and prototype states of WWER NPP

Ilya A. Molev, Denis A. Solovyev ✉, Alexey L. Lobarev, Denis A. Plotnikov, Hamza A. Tahash, Evgeniy V. Chernov
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia
✉ *vulture@inbox.ru*

Abstract. The paper considers some possible input data of NPP power unit model for solving the problem of model state matching with prototype state. In the course of work on matching the state of NPP model with the prototype, a numerical experiment using full-scale modeling complex PROSTOR was conducted. Its essence was to obtain steady states of the model with capacity from 94% to 104% with a step of 0,05%. For modeling we used data of Kalinin NPP unit 3 loading 4 on 248 effective days. When analyzing the results of the numerical experiment, two effects were found. One of them, expressed in the bend of the derivative of the obtained graph,

© Молев И.А., Соловьёв Д.А., Лобарев А.Л. и др., 2023

is connected with reaching the upper limit of the possibility to regulate the pressure in the main steam collector. The regulating valves on the turbine generator are the executing mechanism of pressure regulator in main steam collector. At the break of the graph they open at 100%, which causes further inability to regulate pressure. The pressure in the main steam collector starts to increase. This effect corresponds to the real processes occurring at the NPP. In this case, as one of the model tuning parameters, it is proposed to use the adaptive coefficient to the concentration of boric acid in the reactor, for the control of which, it is proposed to use a mathematical boric regulator. It was also shown that it is impossible to accurately control the pressure in the reactor due to the peculiarities of operation of the volume compensator electric heaters automatics. In this regard, it was proposed to use an additional mathematical volume compensator electric heaters regulator to match the state of the model with the prototype. These regulators have been successfully tested as part of the PROSTOR software package to match the states of the model and the prototype.

Keywords: boron regulator, pressure regulator, reactor, VVER, PROSTOR, volume compensator electric heaters, prototype.

For citation: Molev I.A., Solovyev D.A., Lobarev A.L., Plotnikov D.A., Tahash H.A., Chernov E.V. Input Data to Match Model and Prototype States of WWER NPP. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):57-65 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-07

Введение

В настоящее время, в связи с интенсивным развитием моделирующих комплексов АЭС и постоянным повышением их точности описания реальных процессов, возникают новые пути использования таких комплексов [1]. Так, например, актуальной на сегодня задачей является создание цифрового двойника АЭС, т.е. виртуальной копии АЭС[1].

Для создания такой копии необходимо решить задачу приведения состояния модели АЭС к состоянию самого энергоблока [2, 3].

Для решения этой задачи мы можем представить модель реакторной установки (РУ) в виде вектор-функции, выражение (1) [4]:

$$\vec{y} = f(x_1, x_2, ..., x_n, p_1, p_2, ..., p_m), \quad (1)$$

где $\vec{y}$ – вектор всех расчетных значений модели;

$x_1, x_2, ..., x_n$ – параметры настройки модели или адаптивные коэффициенты модели;

$p_1, ..., p_m$ – входные данные модели.

Отметим отличие между параметрами или адаптивными коэффициентами модели и входными данными модели. Первые являются свойствами энергоблока или, вернее, оборудования РУ и не должны меняться в течении одной кампании. Например, это гидравлическое сопротивление на выходе из парогенераторов. Вторые являются граничными условиями модели и существуют для приведения состояния модели к текущему состоянию энергоблока. Ясно, что они меняются в течение кампании. Например, для рассматриваемой модели – давление пара в главном паровом коллекторе (ГПК).

Вектор всех расчетных значений модели $\vec{y}$ в общем случае может иметь большую размерность, но для нашей задачи мы можем ограничить его размерность только измеряемыми экспериментально параметрами: температура, давление и др.

Задачу приведения модели к состоянию энергоблока можно сформулировать как задачу минимизации отклонения данной функции ($\vec{y}$) от экспериментальных данных ($\vec{y}_{экп}$), нормированных на погрешности данных ($\Delta\vec{y}$), выражение (2):

$$\frac{\vec{y} - \vec{y}_{экп}}{\Delta\vec{y}} \to \min. \quad (2)$$

---

[1] Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» ИБРАЭ РАН; 2020. URL: http://ibrae.ac.ru/contents/362/

Параметры управления энергоблоком

Для управления АЭС используются регуляторы, в первую очередь, это автоматический регулятор мощности (АРМ) и электронная часть системы регулирования турбины (ЭЧСР).

АРМ на АЭС с ВВЭР предназначен для регулирования мощности реактора в следующих наиболее используемых режимах:

–поддержание постоянного значения плотности нейтронного потока (режим «Н»);

–поддержание постоянного давления пара в ГПК (режим «Т»).

Также существуют другие редко используемые режимы работы АРМ, не рассматриваемые в данной статье.

Конечным исполняющим механизмом АРМ является система управления и защиты (СУЗ) РУ.

ЭЧСР в стационарных состояниях блока также имеет несколько режимов работы:

–режим регулирования мощности (РМ). При работе ЭЧСР в режиме РМ, осуществляется регулирование электрической нагрузки генератора в соответствии с установленным заданием. Режим РМ включается, если АРМ реактора находится в режиме «Т»;

–режим регулирования номинального давления свежего пара (РД). При работе ЭЧСР в режиме РД регулятор поддерживает номинальное давление пара перед турбиной. Режим РД включается при работе АРМ реактора не в режиме «Т»;

–режим регулирования минимального давления свежего пара (РДмин). ЭЧСР переходит в режим РДмин автоматически в случае недопустимого снижения давления свежего пара в ГПК.

Конечным исполняющим механизмом ЭЧСР являются регулирующие клапаны турбогенератора.

При работе в стационарном режиме на разных энергоблоках могут использоваться как сочетания ЭЧСР в режиме РМ и АРМ в режиме «Т», так и ЭЧСР в режиме РД и АРМ в режиме «Н».

Установка и согласование мощностей модели и реального реактора

Первым параметром, обращающем на себя внимание при решении задачи восстановления состояния энергоблока, является тепловая мощность реактора.

Полномасштабные моделирующие комплексы имеют в своем составе подсистемы автоматики энергоблока, в которых полностью моделируются вышеописанные регуляторы. То есть существует возможность восстановления состояния реактора через использование модельных аналогов автоматики энергоблока.

Но для решения задач восстановления состояния АЭС в модели важна скорость расчета, которую не может обеспечить вышеописанный стационарный режим работы регуляторов реакторной установки из-за большого времени задержки между возмущением, вносимым конечным исполняющим механизмом регулятора, и изменением измеряемых параметров. Задержка обусловлена инерционностью физических процессов, протекающих на РУ, и связанных с ней систем. При работе АРМ в режиме «Т» измеряемым параметром является давление в ГПК, а исполняющим механизмом являются стержни СУЗ, находящиеся в активной зоне реактора.

С другой стороны, в идеальных условиях при достоверном знании положения органов регулирования (ОР) СУЗ, концентрации борной кислоты, выгорания каждой ТВС, распределения температур и закрутки потока теплоносителя в активной зоне (АЗ) возможно полное моделирование режима работы АРМ и соответственно согласование модельных данных с реальными. Но известные данные не полны и определяются с погрешностями, а некоторые процессы, происходящие в АЗ (такие как закрутка потока теплоносителя [5, 6]), до сих пор мало изучены. В связи с этим для согласования

мощности РУ в модели с реальной необходимо вводить инженерные коэффициенты, учитывающие вышеописанные погрешности и особенности.

Для согласования и приведения мощности, получаемой по модели реактора, к реальной мощности удобно один из таких коэффициентов ввести как множитель к концентрации борной кислоты в реакторе. Но при его скачкообразном изменении при настройке модели и, соответственно, таком же изменении концентрации бора в реакторе скачкообразно изменится реактивность, что приведет к нежелательным физическим эффектам и в том числе реакции на них автоматики АЭС. Чтобы такого скачка мощности не происходило, для быстрой установки состояния модели предлагается использовать математический борный регулятор.

Параметром, подаваемым на вход, математического борного регулятора является тепловая мощность реактора, выходным же или исполняющим механизмом является концентрация борной кислоты во всех узлах модели реактора. Таким образом, математический борный регулятор при задаче поддержания мощности является аналогом АРМ в режиме «Н».

При этом алгоритм работы АРМ был оставлен без изменений, разница между моделируемым АРМ и математическим борным регулятором лишь в конечном исполнительном механизме, т.е. в стержнях СУЗ и концентрации борной кислоты в реакторе соответственно.

Динамика давления 1-го контура

Для исследования возможности приведения состояния модели АЭС к заданной мощности был проведен численный эксперимент с использованием полномасштабного моделирующего комплекса «ПРОСТОР» [7,8]. Суть его заключалась в получении стационарных состояний модели с мощностью от 94% до 104% с шагом 0,05%. Для моделирования использовались данные 3-й загрузки 4-го блока Калининский АЭС на 248-е эффективные сутки. Приведение к заданной мощности осуществлялось с помощь алгоритмов работы АРМ в режиме «Н», но вместо стержней СУЗ был использован математический борный регулятор, ЭЧСР работал в режиме «РД».

Частичные результаты эксперимента представлены на рисунке 1. Целью эксперимента являлась рассмотрение возможности установки мощности РУ с минимальным отклонением от заданной.

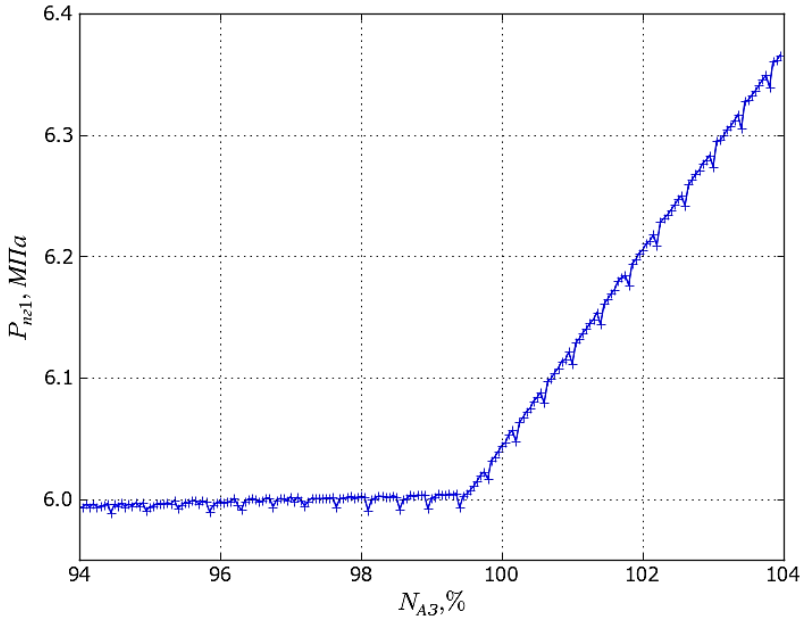


Рисунок 1. Зависимость давления на выходе ПГ-1 от задаваемой мощности
Figure 1. Dependence of the pressure at the SG-1 outlet on the given power

При исследовании результатов численного эксперимента были обнаружены два эффекта. Один из них, выраженный в изломе производной графика, связан с достижением верхней границы возможности регулирования давления в ГПК. Исполняющим механизмом регулятора давления в ГПК являются регулирующие клапаны на турбогенераторе. В момент излома графика они открываются на 100%, чем обуславливается дальнейшая невозможность регулирования давления. Давление в ГПК начинает расти, что и показано на рисунке 2. Этот эффект соответствует реальным процессам, происходящим на АЭС.

Второй эффект, связанный с регулярным небольшим падением давления, определяется алгоритмом работы трубчатых электронагревателей компенсатора давления (ТЭН КД). При равномерном повышении мощности с последующим выходом в стационарное состояние давление в реакторе будет повышаться. При достижении давления 15,75 МПа срабатывает автоматическое отключение всех ТЭН КД, которые включатся только при понижении давления. В этот момент для получения стационарного состояния модель ожидает понижения давления при выключенном ТЭН КД. Изменение давления в реакторе при работе ТЭН КД показано на рисунке 2.

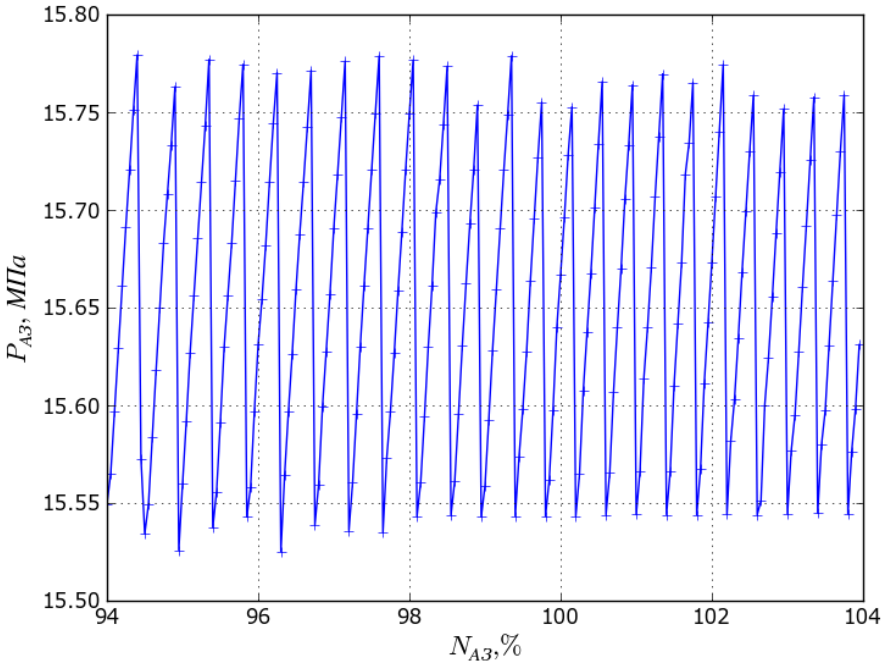


Рисунок 2. Зависимость расчетного давления в реакторе от уровня задаваемой мощности через АРМ
Figure 2. Dependence of the simulated pressure in the reactor on the level of the set power through the automatic power controller

Можно определить четкие границы изменения давления в реакторе, которые соответствуют уставкам включения и отключения 1-й группы ТЭН КД. Регулярное колебание мощности и других параметров обусловлено именно этими колебаниями давления в реакторе.

Данный эффект также соответствует реальным процессам, происходящим в РУ, и на основании представленных данных можно сделать вывод о невозможности точного управления давлением в реакторе из-за особенностей работы автоматики ТЭН КД. Но так как для восстановления состояния энергоблока в модели необходимо точно согласовывать модельное и реальное давление 1-го контура, то требуется дополнительный алгоритм установления давления в модели реактора.

Одним из простых решений такого алгоритма видится в более чувствительном управлении ТЭН КД. Возможно, модельно изменять уставки включения и выключения 1-ой группы ТЭН КД для получения нужного давления в модели реактора. Так с

изменением в модели уставки регуляторов работы ТЭН КД в процессе получения состояния аналогичного состоянию РУ, данные регуляторы приведут в соответствие станционному давление в 1-м контуре. Блок-схема одного из возможных регуляторов, решающих эту задачу приведена на рисунке 3.

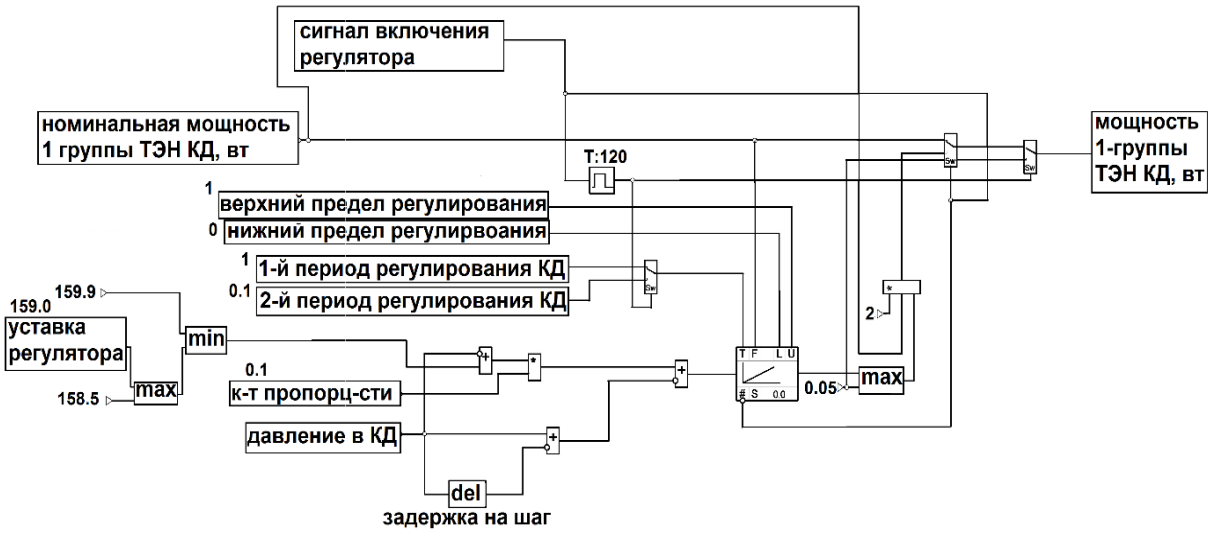


Рисунок 3. Блок-схема математического регулятора управления ТЭН КД
Figure 3. Block diagram of the mathematical controller for the control of the pressurizer heater

Рассмотрим подробнее пример по моделированию изменения давления в реакторе при работе математического регулятора ТЭН КД и сравним полученные результаты с результатами, полученными путем моделирования давления в реакторе без работы этого регулятора. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.

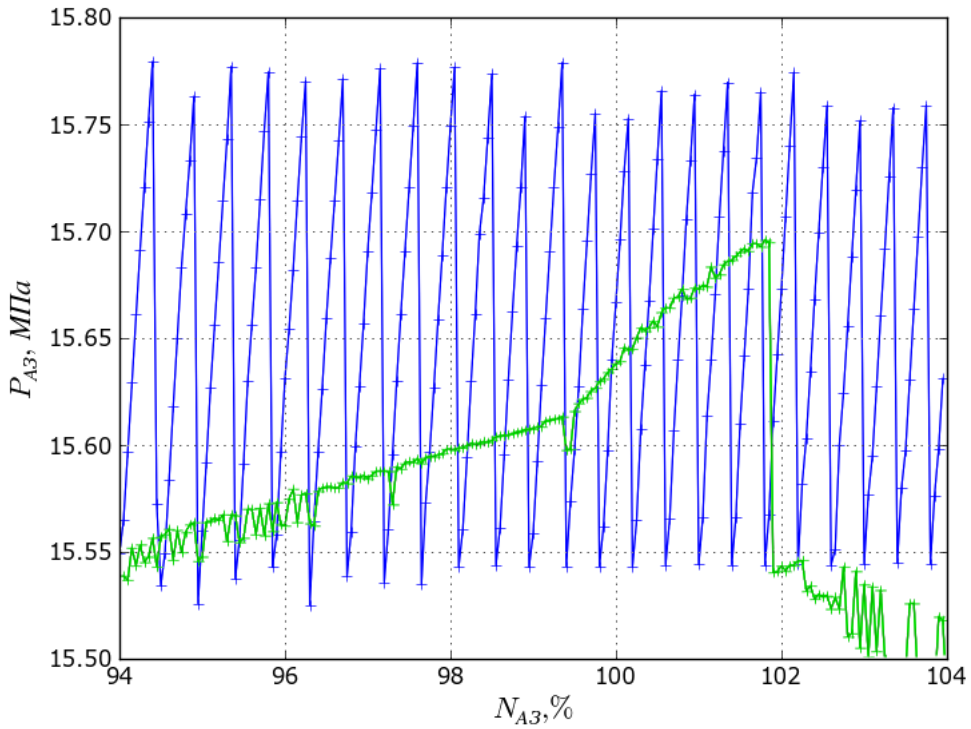


Рисунок 4. Зависимость расчетного давления в реакторе от уровня задаваемой мощности через АРМ при работе математического регулятора ТЭН КД (зеленый) и без работы этого регулятора (синий)
Figure 4. Dependence of the model pressure in the reactor on the level of the set power through the automatic power controller during the operation of the mathematical controller of the pressurizer heater (green) and without the operation of this controller (blue)

В ходе данного эксперимента уставка математического регулятора ТЭН КД повышалась вместе с уровнем мощности в АЗ, что объясняет положительную производную зеленого графика до 102% мощности. После 102% при достижении давления 15,7 МПа в АЗ сработало импульсно-предохранительное устройство (ИПУ) компенсатора давления, понизившее давление и нарушившее режим работы регулятора.

Также легко видеть из графика, что погрешность установки давления в КД регулятором составляет менее 0,02 МПа.

Излом производной приблизительно при 99,5% мощности связан с достижением верхней границы возможности регулирования давления в ГПК 2-го контура. Этот эффект описывался выше в комментариях к рисунку 1.

График зависимости давления во втором контуре от задаваемой мощности при работе регулятора ТЭН КД представлен на рисунке 5.

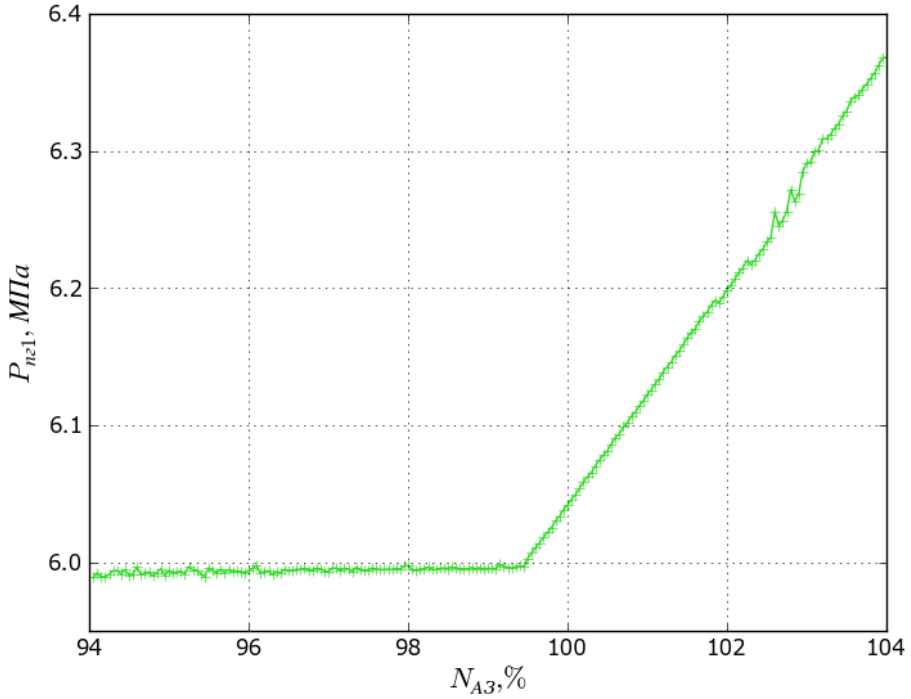


Рисунок 5. Зависимость давления на выходе ПГ-1 от задаваемой мощности через АРМ при работе математического регулятора ТЭН КД
Figure 5. Dependence of the pressure at the outlet of the SG-1 on the set power through the automatic power controller during the operation of the mathematical controller of the pressurizer heater

Сравнив этот график с рисунком 1 легко также обнаружить уменьшение погрешности задаваемого давления, вызванной работой ТЭН КД.

Подчеркнем, что применение данного математического регулятора ТЭН КД, возможно только для получения начального состояния модели РУ аналогичного реальному. Для моделирования динамических процессов этот регулятор использоваться не может. Но при соответствии в начальном состоянии давления в КД модели экспериментально измеряемому, полученному с помощью вышеописанного способа, и известном состоянии работы ТЭН КД легко привести в соответствие процесс в модели реальному процессу РУ.

Заключение

В статье рассмотрены некоторые возможные входные данные модели энергоблока АЭС для решения задачи согласования состояния модели с состоянием прототипа.

В качестве одного из параметров настройки модели предлагается использовать адаптивный коэффициент к концентрации борной кислоты в реакторе, для управления которым, предлагается использовать математический борный регулятор.

Также была показана невозможность точного управления давлением в реакторе из-за особенностей работы автоматики ТЭН КД. В связи с этим предложено использовать дополнительный математический регулятор управления ТЭН КД для согласования состояния модели с прототипом.

Данные регуляторы успешно опробованы в составе программного комплекса «ПРОСТОР» для согласования состояний модели и прототипа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Паппе И.Н., В.С. Володин Применение математических моделей на различных стадиях жизненного цикла российских АСУ ТП АЭС. *Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС = Instrumentation and control systems for NPP and TPP : материалы II Международной научно-технической конференции, Минск, 27-28 апреля 2021 года.* Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; 2021. С. 182–188.

2. Аверьянова С.П., Ковель А.И., Мамичев В.В., Филимонов П.Е. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора». *Атомная энергия*. 2008;4(4):237–240.

3. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Настройка модели на текущее состояние реактора. *Атомная энергия*. 1996;80(6):482–485.

4. Выговский С.Б., Молев И.А. Страшных В.П. и др. Вариационная методика расчета теплового баланса РУ с ВВЭР-1000 с использованием данных АЭС и программного комплекса «ПРОСТОР». *Ядерные измерительно-информационные технологии*. 2009;30(2):13.

5. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Исследование факторов, определяющих температурную стратификацию теплоносителя в горячих нитках петель 1-го контура РУ с ВВЭР-1000. В кн.: *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 8-й международной научно-технической конференции, 28-31 мая 2013.* Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС»; 2013. URL: http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article133-ru.htm

6. Бай В.Ф., Богачек Л.Н., Макаров С.В. Влияние режимов работы ПВД на температурные поля на входе в ТВС активной зоны и ТФХ активной зоны и ТФХ РУ ВВЭР-1000 Калининской АЭС. В кн.: *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 9-й международной научно-технической конференции, 19-22 мая 2015.* Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС»; 2015. URL: http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/article41-ru.htm (дата обращения: 11.01.2023)

7. Выговский С.Б., Чернов Е.В., Семенов А.А., Страшных В.П., Чернаков В.А., Лупишко А.Н., Богачек Л.Н., Бай В.Ф., Чапаев В.М. Опыт использования программного комплекса ПРОСТОР в расчетной поддержке эксплуатации Калининской АЭС и перспективы его дальнейшего применения на АЭС с ВВЭР-1000. В кн.: *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 8-й международной научно-технической конференции, 28-31 мая 2013.* Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС»; 2013. URL: http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/documents/mntk2013-125.pdf (дата обращения: 21.01.2023)

8. Семенов А.А., Выговский С.Б., Чернаков В.А., Щукин Н.В. Опыт использования программного комплекса ПРОСТОР и перспективы его дальнейшего применения. В кн.: *Сборник трудов научной сессии МИФИ – 2004. Физико-технические проблемы нетрадиционной энергетики. Физико-технические проблемы ядерной энергетики.* 2004;(8):79–80. URL: http://library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2004/8/079.pdf (дата обращения: 21.01.2023)

ВКЛАД АВТОРОВ:

И.А. Молев, 20% – разработка методики приведения состояния модели реактора к состоянию прототипа, работа с экспериментальными данными, выбор переменных для исследования;

Д.А. Соловьёв, 20% – проведение модельного эксперимента с ТЭН КД при разных уровнях мощности;

А.Л. Лобарев, 15% – исследование изменения давления в реакторе в описываемых экспериментах;

Д.А. Плотников, 15% – создание математического регулятора управления ТЭН КД;

Х.А. Танаш, 15% – исследование работы регулятора ГПК в приводимых экспериментах;

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Molev I.A., 20% – development of a methodology for bringing the state of a reactor model to the state of a prototype, working with experimental data, choosing variables for research;

Solovyov D.A., 20% – conducting a model experiment with a KD heating element at different power levels;

Lobarev A.L., 15% – study of pressure changes in the reactor in the described experiments;

Plotnikov D.A., 15% – creation of a mathematical controller for the control of the pressurizer hrater;

Tanash H.A., 15% – study of the operation of the CHP regulator in the experiments presented;

Е.В. Чернов, 15% – создание математического борного регулятора и методики его использования.

БЛАГОДАРНОСТИ:
Авторы благодарят С.Б. Выговского за многолетнее наставничество и развитие области моделей атомных электростанций.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Отсутствуют.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Илья Александрович Молев, ведущий инженер, ИЯФиТ НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7247-3040 ; e-mail: iamolev@gmail.com

Денис Алексеевич Соловьёв, к.т.н., доцент ИЯФиТ, НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0507-0839 ; e-mail: vulture@inbox.ru

Алексей Леонидович Лобарев, аспирант ИЯФиТ, НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5258-3357 ; e-mail: lobarev.alexey@gmail.com

Денис Алексеевич Плотников, аспирант ИЯФиТ НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9387-170X ; e-mail: pda1995@gmail.com

Хамза Ахмад Танаш, аспирант ИЯФиТ НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7831-8516 ; e-mail: tanash_hamza@yahoo.com

Евгений Владимирович Чернов, старший преподаватель ИЯФиТ НИЯУ «МИФИ», Москва, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2818-6324 ; e-mail: chernov.e@inbox.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023
После доработки 28.04.2023
Принята к публикации 04.05.2023

.

Chernov E.V., 15% – creation of a mathematical boron controller and methods of its use.

ACKNOWLEDGMENTS:
The authors thank S.B. Vygovsky for many years of mentoring and development of the field of nuclear power plant models.

FUNDING:
Absent.

CONFLICT OF INTEREST:
The authors declare no conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Ilya A. Molev, Lead Engineer, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI Moscow, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7247-3040 ; e-mail: iamolev@gmail.com

Denis A. Solovyev, PhD, Assistant Professor, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0507-0839 ; e-mail: vulture@inbox.ru

Alexey L. Lobarev, Graduate Student, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5258-3357 ; e-mail: lobarev.alexey@gmail.com

Denis A. Plotnikov, Graduate Student, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9387-170X ; e-mail: pda1995@gmail.com

Hamza A. Tahash, Graduate Student, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7831-8516 ; e-mail: tanash_hamza@yahoo.com

Evgeniy V. Chernov, Senior Lecture, Institute of Nuclear Physics and Engineering National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2818-6324 ; e-mail: chernov.e@inbox.ru

Received 13.02.2023
Revision 28.04.2023
Accepted 04.05.2023

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5: 519.217
DOI 10.26583/gns-2023-02-08
EDN BWGUOU

Возможность продления кампании действующих энергоблоков ВВЭР-1000 за счет работы на скользящем давлении второго контура

А.С. Грачёв [1, 2], А.А. Лапкис [1, 2] ✉, А.Ю. Смолин [1]
[1] Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия
[2] Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия
✉ *AALapkis@mephi.ru*

Аннотация. В работе рассматривается эффективность и возможность внедрения в эксплуатационную практику энергоблоков ВВЭР-1000 режима продления кампании на скользящем давлении второго контура. Рассмотрена история исследований отечественных атомщиков в части продления кампании реакторов ВВЭР. Показано, что снижение давления свежего пара в допускаемых пределах позволит высвободить дополнительную реактивность за счет высвобождения температурного эффекта и выработать дополнительную энергию в период работы блока на мощностном эффекте. Составлена математическая модель изменения основных параметров реакторной установки, включающая уравнения баланса реактивности, уравнение Стодолы-Флюгеля для турбины, уравнений теплового баланса и теплопередачи в парогенераторе. Выполнен расчёт ожидаемого прироста выработки электроэнергии для современных топливных загрузок реакторов ВВЭР-1000. Проанализирована степень соответствия предлагаемого режима действующим технологическим ограничениям энергоблока ВВЭР-1000 «большой серии». Результаты анализа подтверждены численным экспериментом на многофункциональном анализаторе режимов реакторной установки ВВЭР-1000 разработки НИЯУ МИФИ, построенном на основе среды ЭНИКАД и аттестованного диффузионного нейтронно-физического кода ПРОСТОР. Сделаны выводы о возможности внедрения предлагаемого режима в эксплуатационную практику современных энергоблоков ВВЭР-1000.

Ключевые слова: реактор, ВВЭР-1000, кампания, запас реактивности, мощностной эффект, температурный эффект, парогенератор, скользящее давление.

Для цитирования: Грачёв А.С., Лапкис А.А., Смолин А.Ю. Возможность продления кампании действующих энергоблоков ВВЭР-1000 за счет работы на скользящем давлении второго контура. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):66–76. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-08

Potential and possibility of extending the campaign to increase VVER-1000 power units on sliding distribution of the secondary circuit

Aleksander S. Grachev [1, 2], Aleksander A. Lapkis [1, 2] ✉, Aleksander Yu. Smolin [1]
[1] Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia
[2] Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia
✉ *AALapkis@mephi.ru*

Abstract. The paper considers the efficiency and possibility of implementing into the operational practice of VVER-1000 power units the campaign extension mode at the sliding pressure of the second circuit. The history of research of Russian nuclear scientists in terms of extending the campaign of VVER reactors is considered. It is shown that reducing the pressure of fresh steam within the permissible limits will release additional reactivity due to the release of the temperature effect and generate additional energy during the operation of the unit on the power effect. A mathematical model of changes in the main parameters of the reactor plant has been compiled, including the reactivity balance equations, the Stodola-Flugel equation for the turbine, the equations of thermal

© 2023 Грачёв А.С., Лапкис А.А., Смолин А.Ю., 2023

balance and heat transfer in the steam generator. The calculation of the expected increase in electricity generation for modern fuel loads of VVER-1000 reactors has been performed. The degree of compliance of the proposed regime with the current technological limitations of the VVER-1000 «large series» power unit is analyzed. The results of the analysis were confirmed by numerical experiment on a multifunctional mode analyzer of the VVER-1000 reactor unit developed by the MEPhI Research Institute, built on the basis of the ENIKAD medium and the certified diffusion neutron-physical code PROSTOR. Conclusions are drawn about the possibility of introducing the proposed regime into the operational practice of modern VVER-1000 power units.

Keywords: reactor, VVER-1000, campaign, reactivity reserve, power effect, temperature effect, steam generator, sliding pressure.

For citation: Grachev A.S., Lapkis A.A., Smolin A.Yu. Potential and possibility of extending the campaign to increase VVER-1000 power units on sliding distribution of the secondary circuit. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):66-76 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-08

Актуальность проблемы

Продление топливной кампании энергоблока АЭС является актуальным не только из-за вопроса эффективного использования топлива, но и из-за стабильности энергосистемы в целом. Каждые полтора года энергоблоки АЭС с реакторами ВВЭР-1000 вынуждены уходить на планово-предупредительные ремонты (ППР), связанные с необходимостью поддержания исправного состояния и предупреждения выхода из строя эксплуатируемого оборудования, а также перегрузки ядерного топлива. Однако период ремонта может выпасть на неблагоприятное с точки зрения энергосистемы время, когда заместить мощности АЭС проблематично. В некоторых случаях необходимо совместить на одной многоблочной атомной станции завершение ремонта одного энергоблока и начало ремонта следующего. При непредвиденном удлинении ремонта первого необходимо сдвинуть ППР следующего на более поздний срок [1].

В настоящее время ППР реакторной установки ВВЭР-1000 переносят при необходимости, продлевая кампанию реактора за счет использования мощностного эффекта реактивности (МЭР). Достигается это путем некоторого снижения мощности реактора после исчерпания запаса реактивности, что позволяет высвободить скованную МЭР реактивность и продлить топливную кампанию реактора на величину до 30 эффективных суток [1]. Однако существуют и другие способы реализации режима продления кампании (РПК).

Предложенная еще советскими инженерами возможность работы реакторной установки ВВЭР-1000 на скользящем давлении второго контура позволяет также продлить топливный цикл за счет температурного эффекта реактивности (ТЭР). Температура насыщения в парогенераторе снижается при понижении давления в нем, а снижение давления в отборах турбины приводит к понижению температуры питательной воды, что в комплексе обеспечивает более интенсивный теплообмен с теплоносителем первого контура. Более интенсивный теплообмен приведет к снижению температуры уже самого теплоносителя, и поступлению в реактор менее нагретой жидкости. А это, в свою очередь, означает высвобождение связанной ТЭР реактивности, и возможность работы блока в течение дополнительного времени, либо возможность менее глубокой разгрузки в РПК.

В некоторых работах высвобождение температурного эффекта реактивности по теплоносителю отмечается как нежелательное при штатном маневрировании мощностью [2-3]. В тоже время использование температурного регулирования предполагается для реакторов ВВЭР как вариант работы при следовании за нагрузкой [4]. Однако авторы предполагают, что, комбинируя РПК реактора на МЭР и режим

[1] РГ.3.01 Рабочий технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №3 Ростовской атомной станции, 2014.

работы на скользящем давлении второго контура, мы можем максимально эффективно продлить топливную кампанию, снизив экономические потери атомной станции, связанные с недовыработкой энергии [1].

Существующий способ продления кампании

В работе рассмотрены три варианта реализации РПК:

– пошаговое снижение мощности, поддерживаемое системой регулирования, и высвобождение реактивности за счет МЭР, реализуемое на действующих блоках ВВЭР-1000;

– перевод блока в режим самопроизвольного снижения мощности, путем отключения регулятора мощности реактора, не применяемый в настоящее время на АЭС;

– пошаговое снижение мощности, сочетаемое со снижением давления во втором контуре.

Эффективность продления кампании (как можно большее количество дополнительных дней работы на как можно более высоком уровне мощности) у представленных вариантов различается.

Первый и второй режимы, по сути, подобны. Можно рассмотреть второй режим как пошаговое снижение мощности с чрезвычайно малым шагом. Поэтому рассмотрим реализуемый на АЭС способ продления кампании.

Регламент безопасной эксплуатации энергоблока ВВЭР-1000 в настоящее время разрешает работу блока в режиме продления кампании с использованием МЭР в течение не более 30 эффективных суток в соответствии с регламентом безопасной эксплуатации энергоблока. При этом снижение мощности не должно превышать 30 % от номинального уровня мощности, а давление в первом и втором контурах и температуру теплоносителя на входе в реактор предписано поддерживать на номинальном уровне.

В этом случае снижение мощности обеспечит пошаговое высвобождение реактивности с последующей его тратой при работе на данном уровне мощности, как показано на рисунке 1.

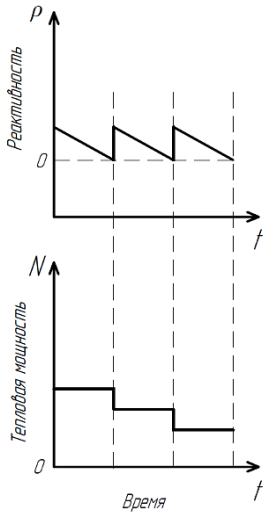


Рисунок 1. Пошаговое высвобождение реактивности при работе на МЭР
Figure 1. Stepwise release of reactivity when working on power reactivity effect

Так, для последних топливных загрузок Ростовской АЭС мощность реактора на 30-е сутки работы на МЭР снижается до 2300-2400 МВт. Это позволяет разгружать реактор на 100-150 МВт каждые 5-7 дней в РПК.

При поддержании постоянного давления во втором контуре в период работы на МЭР снижение температуры теплоносителя можно оценить по статической

характеристике энергоблока, подразумевающей линейную связь мощности реактора и температурного перепада между контурами, формула (1):

$$\frac{N}{N_0} = \frac{t_{1к} - T_S}{t_{1к(0)} - T_S}, \quad (1)$$

где N и N_0 – соответственно действующая и номинальная тепловая мощность, МВт;

T_s – температура насыщения в парогенераторах;

$t_{1к}$ – средняя температура теплоносителя в 1-м контуре.

Таким образом, легко показать снижение температуры теплоносителя и соответствующее высвобождение реактивности при снижении мощности. При этом потенциал введения положительной реактивности, связанный со снижением температуры второго контура, остается не использован.

Расчет длительности работы на сниженных уровнях мощности и температуры входа в реактор выполняется в аттестованном нейтронно-физическом комплексе БИПР-7А специалистами атомной станции. Результаты расчета вносят в альбом нейтронно-физических характеристик (АНФХ) топливной загрузки, фрагмент которого для одной из последних кампаний энергоблока 3 Ростовской АЭС [2] приведен в таблице 1.

Таблица 1. Фрагмент АНФХ действующей топливной загрузки ВВЭР-1000
Table 1. Fragment of the active fuel loading of VVER-1000

Эффективное время работы $T_{эфф}$, эфф. сут.	Температура входа в реактор $T_{вх}$,℃	Тепловая мощность W, МВт	Концентрация бора C_B, г/кг	Среднее выгорание по АЗ B, МВт×сут/кгU
460.00	291.0	3120	0.36	30.30
477.29	291.0	3120	0.00	30.99
480.77	290.7	3030	0.00	31.13
484.19	290.4	2940	0.00	31.27
487.65	290.1	2850	0.00	31.41
491.19	289.8	2760	0.00	31.55
494.76	289.4	2670	0.00	31.69
498.38	289.1	2580	0.00	31.84
502.05	288.8	2490	0.00	31.98
505.76	288.5	2400	0.00	32.13
507.29	288.3	2362	0.00	32.19

Опыт продления кампании на скользящем давлении

В 1980-е гг. были опубликованы статьи [1,5-6] советских инженеров, эксплуатирующих Кольскую АЭС, описывающие накопленный положительный опыт эксплуатации атомной установки в режиме продления кампании при скользящих параметрах второго контура. Эксперимент с работой на новом режиме проводился в 1977 г. на блоке с РУ ВВЭР-440 В-230 и 1986 году с РУ ВВЭР-440 В-213. Регламент работы энергоблока в данном режиме заключается в следующем. На начальном этапе энергоблок работает на номинальной мощности за счет ТЭР при постепенном снижении давления во втором контуре (~ до 4,0 МПа). Давление снижалось за счет постепенного открытия регулирующих клапанов обоих турбогенераторов вплоть до их полного открытия, а также отключения системы ПВД. Далее, при невозможности дальнейшего открытия регулирующих клапанов, осуществлялась работа энергоблока за счет МЭР и ТЭР при плавном снижении тепловой мощности реактора и давления во

[2] АНФХ.3.YC.ОЯБиН/3.05 Нейтронно-физические характеристики пятой топливной загрузки реактора ВВЭР-1000, Энергоблок № 3. Альбом. Ростовская АЭС, 2019 г.

втором контуре до предельно допустимого значения (~ до 3,0 МПа). Параметры работы энергоблоков, полученные в результате эксперимента, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Показатели работы энергоблоков Кольской АЭС в РПК при скользящих параметрах второго контура
Table 2. Performance indicators of power units of the Kola NPP in the RPK with sliding parameters of the secondary circuit

Параметр	Диапазон изменения параметров	
	Работа блока В-230 (декабрь-март 1977 г.)	Работа блока В-213 (апрель-июль 1986 г.)
Электрическая мощность, МВт	445-279	461-300
Тепловая мощность, МВт	1385-615	1395-750
Давление пара, МПа: В главном паровом коллекторе В регулирующей ступени	 4,7-2,4 2,8-1,6	 4,7-3,0 2,8-1,8
Средняя температура теплоносителя в первом контуре, °С	278-231	284-252
Давление в первом контуре, МПа	12,5-9,3	12,3-10,1
Температура питательной воды, °С	220-155	220-164
КПД, %	30-25,9	30-25

Эксперимент был признан успешным, однако отмечалось, что внедрение данного режима на действующие энергоблоки с ВВЭР требует решения ряда технических вопросов, главным образом связанных с корректировками уставок технологических защит и блокировок, изначально выставленных таким образом, чтобы обеспечивать безопасную работу энергоблока в установленных проектом пределах, а также прочность основного и вспомогательного оборудования РУ при работе в непроектном диапазоне температур. Перенастройка осуществлялась при снижении давления во втором контуре каждые 0,2 МПа. Основные блокировки, требующие внесения корректировок, относятся к защите по понижению давления в первом контуре, связанной с понижением средней температуры теплоносителя. Это значение в режиме скользящего давления выбирается из условия обеспечения разности значений температуры между «холодной ниткой» и КД не более 70 °С, исходя из прочности соединительного трубопровода.

Значения уставок по фактору «малая течь» определялись из условия обеспечения достаточного запаса до вскипания теплоносителя (не менее 25 °С), причем запас до вскипания теплоносителя определялся как разность между температурой насыщения, соответствующей давлению первого контура, и температурой теплоносителя «горячей нитки». Значения уставок по фактору «большая течь» определялись из условия срабатывания защиты до момента вскипания теплоносителя.

Учитывая, что принцип работы реакторной установки (РУ) ВВЭР-1000 подобен принципу работы ВВЭР-440, возможно рассмотреть применение рассмотренного режима к действующим энергоблокам ВВЭР-1000.

Математическая модель продления кампании

Основные параметры ядерной энергетической установки (ЯЭУ) и второго контура связаны соотношениями:

–уравнениями теплового баланса и теплопередачи в парогенераторах и активной зоне;

–уравнением Стодолы-Флюгеля для расхода пара турбины [7];

–балансом реактивности активной зоны в стационарном режиме;

Связью между расчетными значениями параметров сред двух контуров будут служить уравнения, характеризующие стационарную теплопередачу, происходящую в парогенераторах, формула (2):

$$\begin{cases} G_n \cdot (h_n - h_{\text{пв}}) = G_{1k} \cdot (h_{\text{г}} - h_{\text{х}}) \\ G_n \cdot (h_n - h_{pv}) = KF \cdot (\frac{T_{\text{г}}+T_{\text{х}}}{2} - T_s) \end{cases}, \quad (2)$$

где G_n – расход пара через турбину, кг/с;

h_n – энтальпия свежего пара, кДж/кг;

$h_{пв}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг;

G_1 – расход теплоносителя первого контура, кг/с;

$h_г$ и h_x – соответственно энтальпии теплоносителя в горячей и холодной нитках РУ, кДж/кг;

K – средний коэффициент теплопередачи в парогенераторе, кВт/(м^2·К);

F – суммарная площадь теплопередачи в парогенераторах, м^2;

$T_г$ и T_x – соответственно температуры теплоносителя в горячей и холодной нитках РУ, К.

Уравнение Стодолы-Флюгеля в упрощенной форме при неизменном положении СРК можно записать формулой (3):

$$\frac{p}{p_0} \cdot = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{п0}}}, \quad (3)$$

где G_{n0} – расход пара (кг/с) на номинальном давлении p_0, МПа;

p – давление свежего пара перед турбиной, МПа.

Баланс реактивности активной зоны может быть записан с учетом отсутствия борной кислоты в первом контуре в РПК, формула (4):

$$\Delta\rho_T + \Delta\rho_N + \Delta\rho_{\text{СУЗ}} \cdot = 0 \quad (4)$$

где $\Delta\rho_T$ – изменение реактивности, связанное со снижением температуры в холодной нитке;

$\Delta\rho_N$ – изменение реактивности, связанное с МЭР, определяемым для ВВЭР-1000 как сумма допплеровского эффекта и эффекта, связанного с изменением нагрева теплоносителя в реакторе;

$\Delta\rho_{СУЗ}$ – изменение реактивности, связываемой рабочей группой СУЗ.

Данная система уравнений была решена при ступенчатом снижении давления свежего пара с шагом 0,2 МПа до 5,6 МПа – значения, которое потребует перенастройки защит и блокировок энергоблока ВВЭР-1000.

Расчетные графики, полученные при решении системы уравнений (2)-(4), приведены на рисунке 2.

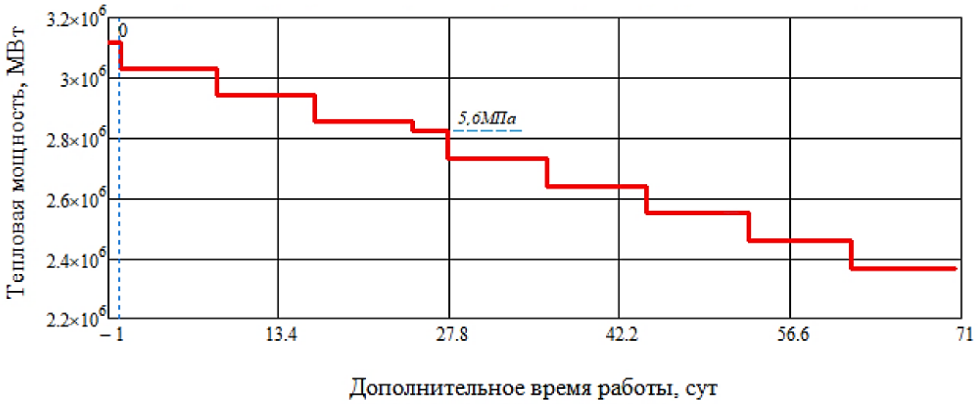


Рисунок 2. Ожидаемые результаты работы реактора в РПК на скользящих параметрах
Figure 2. Expected results of the reactor operation in the RPK on sliding parameters

На данном этапе, при снижении мощности до 2800 МВт и давления второго контура до 5,6 МПа, можно подвести логическую черту и произвести некоторые сравнения с РПК при пошаговом снижении мощности. Возникает вопрос, зачем же подводить логическую черту в середине расчета, когда в РПК с поступенчатым снижением мощности оно происходило до 2362 МВт?

Ответ заключается в том, что дальнейшее снижение параметров второго контура, а как следствие, и мощности, однозначно потребует перенастройки действующих защит и блокировок технологического оборудования, что может вызвать определенные затруднения при внедрении на действующие блоки. Это решаемая задача, однако не помешает выполнить сравнение двух РПК и в этой точке, так как предлагаемый РПК при скользящих параметрах второго контура может теоретически оказаться эффективнее действующего уже на данном этапе, может не потребовать перенастройки блокировок и дальнейшего снижения мощности, и может быть потенциально внедрен и в таком виде.

Результаты расчета вариантов продления кампании

Таким образом, дополнительное время работы реактора ВВЭР-1000 в результате снижения давления с 6,27 до 5,60 МПа оценено как 27 эффективных суток, что значительно дольше, чем при продлении кампании используемым способом (за счет МЭР), на котором при снижении до этой же мощности (около 2730 МВт) дополнительная выработка составит всего 13 эффективных суток.

Однако, перенастроив блокировки и защиты и снизив давление второго контура до 4,76 МПа, а мощность до 2364 МВт (именно до этого значения снижается мощность в РПК за счет МЭР в настоящее время), можно получить гораздо более внушительный результат. Дополнительное время работы реактора в результате этого снижения оценено в 61,0 эффективных суток, что почти в два раза дольше, чем при продлении кампании за счет МЭР на котором при снижении до этой же мощности выработка составит 30 эффективных суток.

Но стоит учитывать, что перенастройка блокировок может быть проблематична, поскольку будет противоречить действующим регламентам и руководствам по эксплуатации, в частности, на турбину. Вероятно, такая перенастройка потребует дополнительных исследований.

Для более детального сравнительного анализа режима продления кампании на скользящем давлении выполнено моделирование ЯЭУ в специализированном программном обеспечении.

Моделирование вариантов продления кампании на многофункциональном анализаторе режимов ВВЭР-1000

Тренажер НИЯУ МИФИ и ООО «ЭНИКО ТСО» «Учебная лаборатория. Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ. Проект 320» [3] представляет собой интегрированный программно-технический и учебно-методический комплекс. Основным компонентом тренажера является модель ЯЭУ с реактором ВВЭР-1000, разработанная на базе аттестованного нейтронно-физического кода «ПРОСТОР» [8]. Качество и практическая значимость использования тренажера подтверждена регулярным применением на АЭС России. Модель ЯЭУ обеспечивает решение многочисленных задач, таких как [9-10]:

– анализ физических процессов, происходящих в активной зоне в штатных режимах, в режимах с нарушениями нормальных условий эксплуатации и проектных аварийных режимах, их взаимосвязи с процессами в других системах энергоблока

[3] Многофункциональный анализатор режимов реакторного отделения 3-го энергоблока Калининской АЭС. Энико ТСО, НИЯУ МИФИ. 2008 г. https://www.eniko.ru/etssite/projects/mfaro3.php

могут обеспечиваться через формирование граничных условий по петлям первого контура или напрямую при моделировании полного объема оборудования ЯЭУ;

– прогнозирование эксплуатационных характеристик оборудования активной зоны и параметров топливного цикла;

– расчетной поддержки проведения плановых экспериментов по определению характеристик самозащищенности и параметров системы управления и защиты реактора (СУЗ);

– исследования алгоритмов СУЗ в различных режимах;

– изучения физических особенностей ВВЭР и формирования целостного понимания процессов в активной зоне реакторной установки в ходе профессиональной подготовки студентов и работников атомной отрасли.

Разработка тренажера осуществлялась до 2013 г., и представленная в нем модель энергоблока уже отличается от ныне действующих энергоблоков в ряде показателей. Главным образом, энергоблок в представленной модели работает на мощности 100% от номинальной мощности (тепловая мощность – 3000 МВт), когда действующие станции прошли модернизацию оборудования и обоснование безопасности и работают на мощности 104% (тепловая мощность – 3120 МВт). Соответственно, и топливные загрузки также несколько отличаются. Однако, принципиальных отличий, которые могли бы повлиять на результаты моделирования в сравнении РПК – нет. Тренажер обеспечивает необходимые для проводимого численного эксперимента качество и динамические характеристики систем и элементов АЭС.

Исходное состояние модели блока – работа энергоблока на 100% от номинальной мощности в начальный момент топливной кампании. Топливная загрузка соответствует 22-й кампании энергоблока 2 Калининской АЭС. Положение 10-й группы ОР СУЗ – 90%. Было проведено моделирование выгорания топлива при автоматической подгонке критической концентрации бора до полного вывода борной кислоты из первого контура. Далее было проведено моделирование в двух вариантах:

1) выгорание топлива при поддержании постоянного давления свежего пара стопорно-регулирующими клапанами;

2) выгорание топлива при открытых стопорно-регулирующих клапанах при свободно снижающемся (скользящем) давлении второго контура.

На рисунках 3 и 4 приведены основные параметры РУ в обоих вариантах, полученные на описанной выше модели.

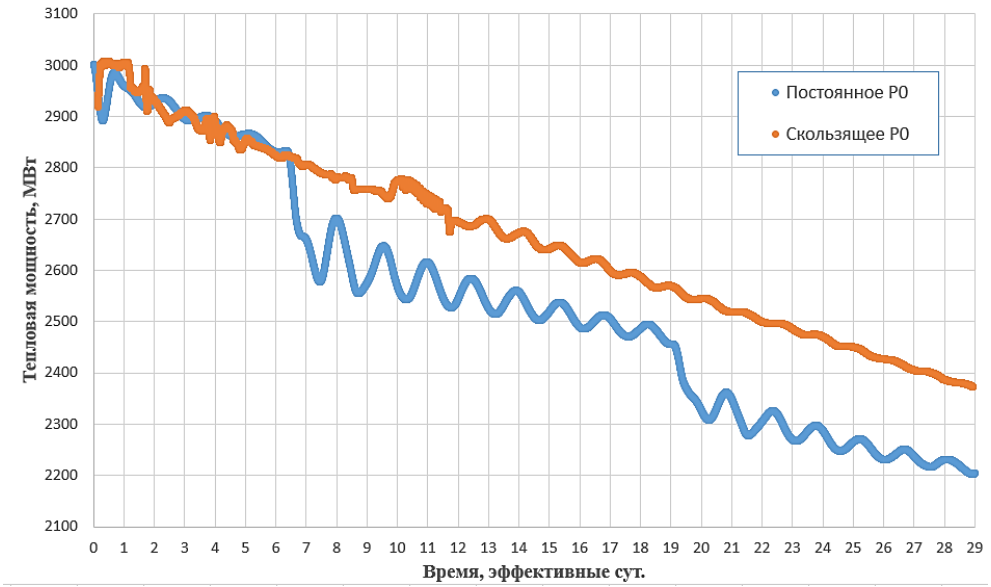


Рисунок 3. Мощность РУ ВВЭР-1000 в период продления кампании
Figure 3. VVER-1000 power plant during the campaign extension period

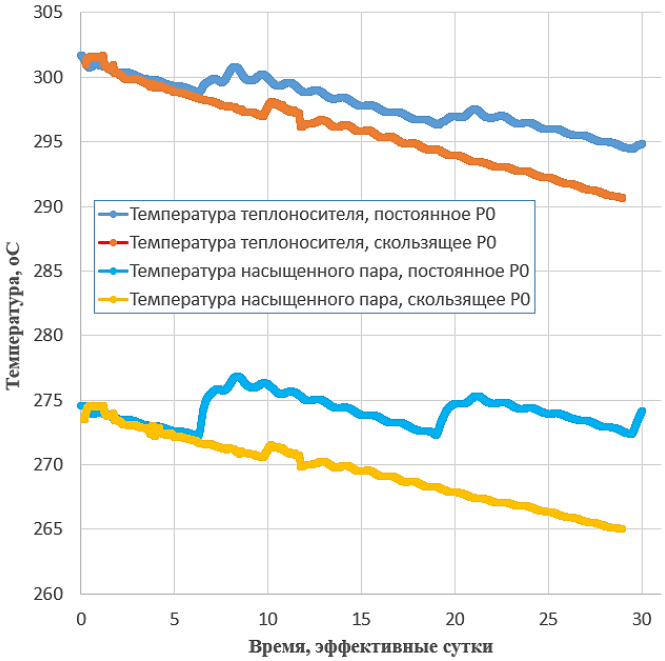


Рисунок 4. Основные температуры РУ ВВЭР-1000 в период продления кампании
Figure 4. Main temperatures of VVER-1000 reactor plant during the campaign extension period

Результаты численного моделирования подтверждают принципиальную закономерность, выявленную аналитическим расчетом по системе уравнений (1-3). Колебания тепловой мощности в обоих режимах имеют период около 35 часов, характерный для ксеноновых процессов. Так, в конце топливной кампании за счет роста нейтронного потока активная зона становится менее устойчива ко ксеноновым колебаниям, что видно на рисунке 3. При этом подавление ксеноновых колебаний при моделировании не проводилось. Более длительные колебания – падения мощности и соответствующий рост давления на 7-е и 20-е сутки процесса – объясняются работой СРК по поддержанию постоянного давления пара второго контура.

Длительность кампании оказывает заметный эффект на экономическую эффективность блоков АЭС [11]. Высвобождение реактивности за счет температурного эффекта позволяет увеличить энерговыработку на величину до 3,5 тыс. МВт*сут (тепловых) при снижении до того же самого уровня мощности, что и только за счет мощностного эффекта. В относительных числах это составляет порядка 4,5-5,0% от полной энерговыработки за первые 30 суток работы в режиме продления кампании. При этом дополнительных капитальных затрат реализация предлагаемого режима не требует.

Заключение

1. За счет совместного использования температурного и мощностного эффектов реактивности ВВЭР-1000 можно на 4-5% увеличить энерговыработку в режиме продления кампании по сравнению с существующим способом продления только на мощностном эффекте. Эффект подтверждается аналитическим расчетом по методу баланса реактивности и численным моделированием.

2. Реализация такого режима возможна при снижении мощности энергоблока на скользящем давлении свежего пара при открытых стопорно-регулирующих клапанах турбины.

3. Снижение давления свежего пара ниже 5,6 МПа потребует перенастройки набора технологических защит и блокировок на энергоблоке ВВЭР-1000.

4. Реализация режима продления мощности на скользящем давлении потребует дополнительных обоснований возможности работы основного оборудования

энергоблока и внесения изменений в регламент безопасной эксплуатации энергоблока, а также в порядок расчета нейтронно-физических характеристик топливных загрузок.

Представляется, что наиболее «проблемными» узлами с точки зрения термоциклической прочности могут оказаться элементы системы компенсации давления при снижении температур теплоносителя в первом контуре и неизменной температуре в объеме компенсатора давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Проскуряков А.Г., Калинов В.Ф., Виденеев Е.Н. Экономическая эффективность работы атомного энергоблока с ВВЭР в режиме продления кампании. *Электрические станции*. 1987;(9):5–8.

2. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Новая технология маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. *Тяжелое машиностроение.* 2019;(1-2);11-22.

3. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Патент № 2675380 C1 Российская Федерация, МПК G21C 7/00. Способ маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. Заявка №2018117898 от 15.05.2018; опубл. 19.12.2018.

4. Джарум Б., Соловьёв Д.А., Семенов А.А. и др. Влияние температурного регулирования при работе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*. 2020;9(3):201–209. https://doi.org/10.56304/S2304487X20030037

5. Андрушечко С.А., Виднеев Е.Н. Работа ВВЭР-440 в режиме продления кампании при скользящем давлении во втором контуре. *Атомная энергия*. 1989;66(1):3.

6. Волков А.П., Трофимов Б.А., Игнатенко Е.И. и др. Работа I блока Кольской АЭС на температурном и мощностном эффекте. *Атомные электрические станции*. 1979;(2):102.

7. Самойлович Г.С., Трояновский Г.С. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. Москва: Энергоатомиздат; 1982. 496 с.

8. 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. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1836web.pdf. (accessed: 09.01.2023).

9. Аль М.Р., Выговский С.Б., Батайне О.В. Исследование влияния характеристик стационарного состояния активной зоны ВВЭР-1000 (1200) на устойчивость реактора к ксеноновым колебаниям. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2020;(3):30–40. https://doi.org/10.26583/npe.2020.3.03

10. Выговский С.Б., Королев С.А., Чернов Е.В. и др. Опыт использования программного комплекса «ПРОСТОР» в расчетной поддержке эксплуатации АЭС с ВВЭР. *Ядерная физика и инжиниринг.* 2014;5(1):15–28.

11. Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Мерзликин Г.Я., Сукрушев А.В. Анализ экономической целесообразности внедрения длительных топливных циклов на АЭС с ВВЭР-1000. *Энергетические установки и технологии.* 2019;5(1):7–13. URL: https://www.sevsu.ru/upload/iblock/9e4/odt84m7d9l1hp1ovy9rsa0sgmuj6ip86/%D0%AD%D0%BD_%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B8_2019-1.pdf (дата обращения: 09.01.2023).

БЛАГОДАРНОСТИ:
Авторы благодарят кафедру автоматики НИЯУ МИФИ и ООО «ЭНИКО ТСО» за возможность работать с анализатором режимов реакторной установки ВВЭР-1000.

ACKNOWLEDGMENTS:
The authors thank the Department of Automation of NRNU MEPhI and ENIKO TSO LLC for the opportunity to work with the VVER-1000 reactor unit mode analyzer.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Авторы заявляют об отсутствии спонсорской помощи при проведении исследования.

FUNDING:
No funding was received by the author for this research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:
The authors declares no conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Александр Сергеевич Грачёв, оператор реакторного отделения второй очереди, Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8314-4533 ; e-mail: sanyag.2009@yandex.ru

Александр Аркадьевич Лапкис, к.т.н., доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Alexandr S. Grachev, Reactor Island Operator, Rostov Nuclear Power Plant – branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0009-0000-8314-4533 ; e-mail: sanyag.2009@yandex.ru

Alexandr A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk

инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; ведущий инструктор учебно-тренировочного подразделения, Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9431-7046 ; e-mail: AALapkis@mephi.ru

Александр Юрьевич Смолин, к.т.н., 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

Поступила в редакцию 13.02.2023
После доработки 28.04.2023
Принята к публикации 04.05.2023

Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»; Senior Instructor of the Training Department, Rostov Nuclear Power Plant – branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9431-7046 ; e-mail: AALapkis@mephi.ru

Alexandr Yu. Smolin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy Department, 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

Received 13.02.2023
Revision 28.04.2023
Accepted 04.05.2023

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5
DOI 10.26583/gns-2023-02-09
EDN GMDHWM

Диагностика привода системы управления и защиты реакторной установки

Е.А. Абидова [1] ✉, П.В. Поваров [1], В.М. Попов [2], О.Ю. Пугачева [1], В.Я. Шпицер [1]

[1] Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия
[2] Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск, Ростовская обл., Россия
✉ *e-abidova@mail.ru*

Аннотация. Привод системы управления и защиты (СУЗ) реактора является системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности. Неисправности приводов СУЗ типа АРК зачастую являются исходными событиями для аварий, приводящих к несанкционированным простоям. Существующие в настоящее время штатные методики контроля параметров СУЗ не позволяют производить достоверную оценку состояния приводов. В настоящей работе предлагается реализовать подход, обеспечивающий повышение чувствительности при распознавании состояний приводов СУЗ АРК, за счет обработки исходных сигналов, которые представляют собой виброакустические сигналы, зарегистрированные на крышке верхнего блока реакторной установки ВВЭР. Предложена процедура обработки диагностических сигналов с использованием анализа сингулярного спектра. Предлагаемый подход отличается от известных наличием процедуры масштабирования, которая реализуется путем умножения матриц собственных значений на ганкелизованные матрицы исходных данных. За счет масштабирования обеспечивается необходимое повышение чувствительности. Предполагаемое повышение чувствительности основано на том, что собственные значения отображают структуру сигналов, которая существенно меняется под воздействием дефекта. Предложенным способом обрабатывались виброакустические сигналы, зарегистрированные на крышке верхнего блока реакторной установки ВВЭР. Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде. Результаты обработки экспериментальных данных говорят о высоком качестве диагностирования. Наглядно подтвердилась гипотеза о том, что различие структуры диагностических сигналов исправного и неисправного оборудования может проявляться в собственных значениях ганкельных матриц сигналов. Предлагаемый в статье подход к обработке диагностических сигналов легко поддается автоматизации и может быть внедрен при разработке системы диагностики привода СУЗ типа АРК.

Ключевые слова: привод СУЗ, система диагностики, диагностический сигнал, анализ сингулярного спектра, эталонный базис, ошибки диагностирования.

Для цитирования: Абидова Е.А., Поваров П.В., Попов В.М., Пугачева О.Ю., Шпицер В.Я., Диагностика привода системы управления и защиты реакторной установки. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):77–87. https://doi.org10.26583/gns-2023-02-09

Diagnostics of the drive of the control and protection system of the reactor plant ark type

Elena A. Abidova [1] ✉, Prokhor V. Povarov [1], Vladimir M. Popov [2], Olga Yu. Pugacheva [1], Vladimir Ya. Shpicer[3,1]

[1] Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia
[2] Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russia
✉ *e-abidova@mail.ru*

Abstract. The drive of the reactor control and protection system (CPS) is a system of normal operation, important for safety. Malfunctions of the drives of the ARC type CPS are often the initial events for accidents leading to unauthorized downtime. The currently existing standard methods for monitoring the parameters of the

© Абидова Е.А., Поваров П.В., Попов В.М. и др., 2023

CPS do not allow for a reliable assessment of the condition of the drives. In this paper, it is proposed to implement an approach that provides an increase in sensitivity when recognizing the states of the drives of the ARC control system by processing the initial signals, which are vibroacoustic signals registered on the lid of the upper unit of the VVER reactor. A procedure for processing diagnostic signals using singular spectrum analysis is proposed. The proposed approach differs from the known ones by the presence of a scaling procedure, which is implemented by multiplying the eigenvalue matrices by the gankelized matrices of the source data. Due to scaling, the necessary sensitivity increase is provided. The expected increase in sensitivity is based on the fact that the eigenvalues reflect the structure of the signals, which changes significantly under the influence of the defect. The proposed method was used to process vibroacoustic signals registered on the lid of the upper block of the VVER reactor unit. Experimental studies were carried out at the test stand of Izhorskiye Zavody OJSC. The results of processing experimental data indicate a high quality of diagnosis. The hypothesis was clearly confirmed that the difference in the structure of diagnostic signals of serviceable and faulty equipment can manifest itself in the eigenvalues of the gankel signal matrices. The approach proposed in the article to the processing of diagnostic signals is easily amenable to automation and can be implemented in the development of a diagnostic system for the drive of an ARC-type CPS.

Keywords: CPS drive, diagnostic system, diagnostic signal, singular spectrum analysis, reference basis, diagnostic errors.

For citation: Abidova E.A., Povarov P.V., Popov V.M., Pugacheva O.Yu., Shpicer V.Ya. Diagnostics of the drive of the control and protection system of the reactor plant ark type. *Global Nuclear Safety.* 2023;13(2):77–87 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-09

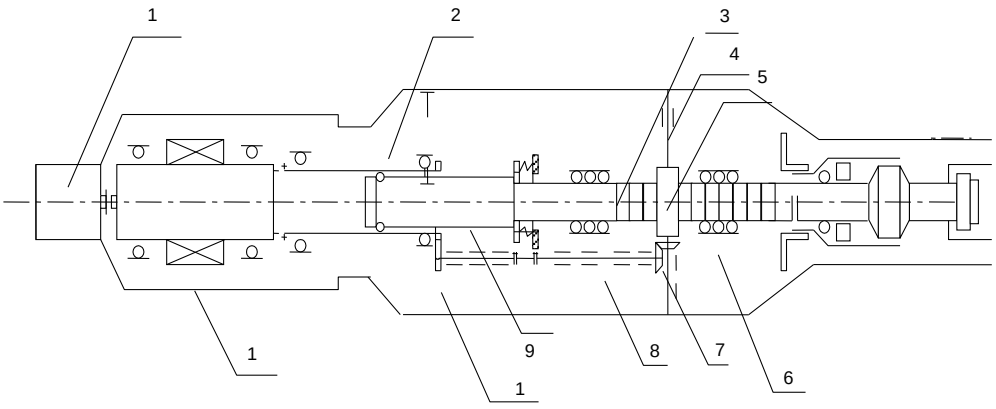
Актуальность проблемы диагностирования привода АРК

Комплекс оборудования СУЗ включает: оборудование исполнительной части аварийной предупредительной защиты, оборудование программно-технического комплекса системы группового и индивидуального управления и контроля положения органов регулирования реактора, оборудование автоматического регулирования мощности, оборудование электропитания и оборудования управления приводами ОР на стенде вертикальном [1,2].

По влиянию на безопасность, в соответствии с НП-001-15 и «Отчета по углубленной оценке безопасности», приводы кассет АРК имеют классификационное обозначение 2Н3У (элементы, отказы которых могут являться исходными событиями, приводящими к проектным авариям).

Для перемещения в активной зоне реактора каждого из 73-х органов регулирования, совмещающего функции компенсации реактивности, регулирования мощности и аварийной защиты реактора, служит привод ОР СУЗ (привод АРК реечного типа). Привода ОР СУЗ устанавливаются в индивидуальных чехловых трубах (чехлах СУЗ), смонтированных на крышке корпуса реактора.

Схема механизма управления реактора ВВЭР-440 представлена на рисунке 1 [1].



1 – датчик линейный ЛД-1; 2 – центробежный регулятор; 3 – рейка; 4 – вал 1; 5 – реечная шестерня; 6 – направляющие ролики; 7 – коническое зацепление; 8 – вал 2; 9 – подшипник; 10 – цилиндрическая передача; 11 – электродвигатель.

Рисунок 1. Схема привода АРК ВВЭР-440
Figure 1. Drive ARC of WWPR 440 diagram

Оборудование, входящее в СУЗ, выполняет следующие функции:

- реализацию аварийной защиты реактора, обеспечивающую быстрый останов реактора при возникновении аварийной ситуации путем обесточивания приводов ОР по постоянному и переменному току;
- реализацию предупредительной защиты реактора, обеспечивающую автоматическое снижение мощности реактора с заданной скоростью путем движения вниз с рабочей скоростью групп органов регулирования, начиная с группы, определенной для движения вниз заданной автоматической последовательностью перемещения групп, либо сброса органов регулирования при возникновении нарушений в работе реакторной установки;
- формирование запрета на движение вверх групп органов регулирования и отдельных органов при поступлении сигнала предупредительной защиты;
- автоматическое дистанционное управление группами и отдельными органами регулирования;
- автоматическое регулирование мощности реактора по заданным программам;
- контроль положения органа регулирования по сигналам датчиков положения.

Неисправности приводов СУЗ зачастую являются исходными событиями для аварий, приводящих к несанкционированным простоям [3,4].

Существующие методы диагностирования привода АРК

Проведя анализ методов диагностики механизмов роторного действия, возможно, выделить три основных подхода в задачах описания состояний объектов диагностирования.

В первом подходе значения технологических параметров сравнивают с уставками [5]. Например, при диагностике АРК оцениваются следующие параметры:

–ток фазы № 1 – 3 электродвигателя в режиме движения, 10 + 15 % А;

–напряжение на вторичных обмотках датчика положения, 14 + 25 % В;

–рабочий ход рейки привода, 2500 ± 0,8 % мм и т.д.

Однако данный метод имеет ряд недостатков: грубость в оценке измерений, ограничение одним классом диагностируемого оборудования, невозможность обнаружения места возникновения дефекта.

Вторым по распространенности методом диагностики механизмов роторного действия является спектральный анализ [6,7]. Как правило, диагностический сигнал можно представить в виде комбинации отдельных синусоидальных волн. Синусоидальные волны в графике (спектре) будут отображаться в частотной области в виде вертикальных линий, при чем, положение и высота линии представляют соответственно частоту и амплитуду. Анализ спектра основывается на зависимости амплитуды от частоты и сравнении частотных пиков с частотой срабатывания деталей механизма. Это одна из причин, по которой метод спектрального анализа и другие частотные методы эффективны для обнаружения неисправностей в механизме. Во временной области некоторые частотные особенности сигнала не видны, но их можно наблюдать в спектре. Однако спектральный анализ не лишен недостатков: затруднительно анализировать переходные процессы; затруднительно анализировать близкие по частоте гармоники; с трудом поддается автоматизации, требуют экспертных навыков. На практике зачастую признаки отклонений в спектре являются статистически малозначимыми и не позволяют однозначно выявить существующие отклонения в оборудования, а лишь могут дать примерную картину о состоянии объекта диагностирования и его основных узлов.

Анализ спектра акустического сигнала не всегда удобен, поскольку с трудом поддается автоматизации, зачастую требует ручной обработки, выполняемой экспертом.

В основе третьего подхода лежит статистическая оценка вероятности принадлежности анализируемого состояния к одному из классов (в простейшем случае к двум классам «оборудование исправно» и «оборудование неисправно»). Данный подход требует проведения серии экспериментов для получения выборок параметров, соответствующих исправному состоянию и дефектам [8]. Выборки представляются в виде функций распределения вероятности (рис. 2), по которым возможна оценка вероятности пропуска дефекта (ошибка второго рода) и ложной информации о дефекте (ошибка первого рода).

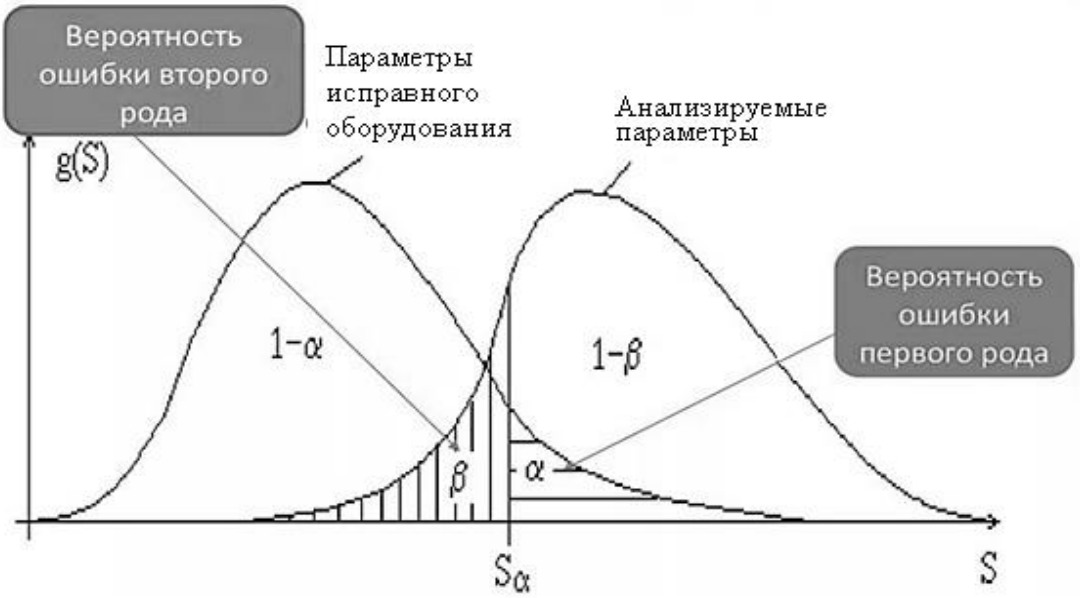


Рисунок 2. Функции распределения вероятности параметров системы
Figure 2. Probability distribution functions of system parameters

Данный подход имеет преимущества: 1) обобщенный учет всех значений параметров, описывающих динамику состояния; 2) простота реализации в автоматизированных системах диагностики.

Научной задачей в случае реализации третьего подхода является выбор чувствительных параметров, практически исключающих вероятности ошибок, или (что проще реализуемо) применение к исходным данным методов обработки (например, фильтрации) для повышения чувствительности.

Особенности диагностических сигналов привода АРК

В настоящей работе предлагается реализовать подход, обеспечивающий повышение чувствительности при распознавании состояний приводов СУЗ АРК, за счет обработки исходных сигналов. Исходные сигналы представляют собой виброакустические сигналы, зарегистрированные на крышке верхнего блока реакторной установки ВВЭР. Расположение датчиков показано на рисунке 3. Анализ характеристик измеряемых сигналов под действием определенных дефектов проводился с использованием испытательного стенда [9]. Привод при сбросе в режиме аварийной защиты обесточивался. При этом ротор двигателя оставался механически связанным с приводом и при сбросе вращался. За счет вращения и остаточного намагничивания ротора в обмотке статора электродвигателя возбуждалась электродвижущая сила. На вход автоматизированной системы в это же время подавался сигнал с закрепленного на корпусе объекта диагностирования виброакустического датчика.

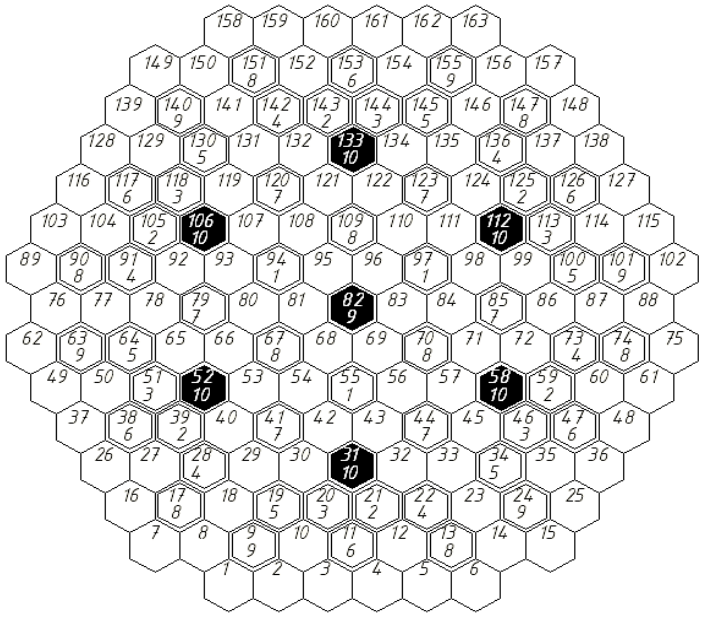


Рисунок 3. Места установки виброакустических датчиков на приводе СУЗ типа АРК
Figure 3. Places of installation of vibroacoustic sensors on the drive of the CPS type ARC

При регистрации в механизм привода вносились дефекты. Выбор дефектов осуществлялся по рекомендации специалистов атомных электростанций, эксплуатирующих привод СУЗ типа АРК. В качестве эталона также зарегистрированы сигналы исправного привода. Пример исходных сигналов представлен на рисунке 4.

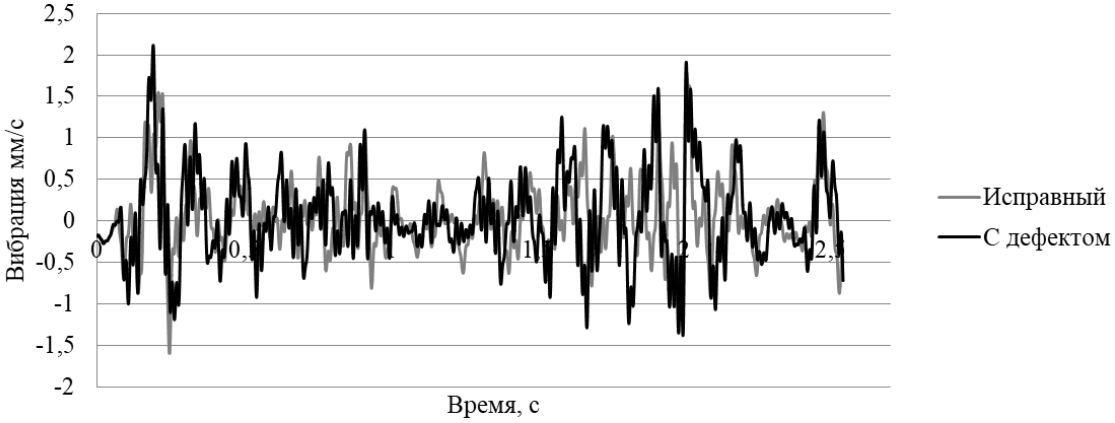


Рисунок 4. Виброакустические сигналы привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)
Figure 4. Vibroacoustic signals of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

Как видно, сигналы представляют собой периодическую последовательность импульсов, при чем, при наличии дефектов амплитуда импульсов несколько увеличивается. Первоначально к сигналам применялись традиционные методы – статистическая обработка и спектральный анализ.

Как видно на рисунке 5, различие амплитуд импульсов при отсутствии и наличии дефекта не обеспечивает достаточное различие для достоверного обнаружения дефектов.

В спектрах сигналов вибрации, которые показаны на рисунке 6, можно наблюдать диагностические признаки (различие амплитуд на отдельных частотных пиках, отклонения частот, на которых наблюдаются пики). Однако, как показал анализ с использованием статистических критериев значимости гипотез [6], признаки

отклонений в спектре являются статистически малозначимыми и не позволяют однозначно выявить существующие отклонения в приводе.

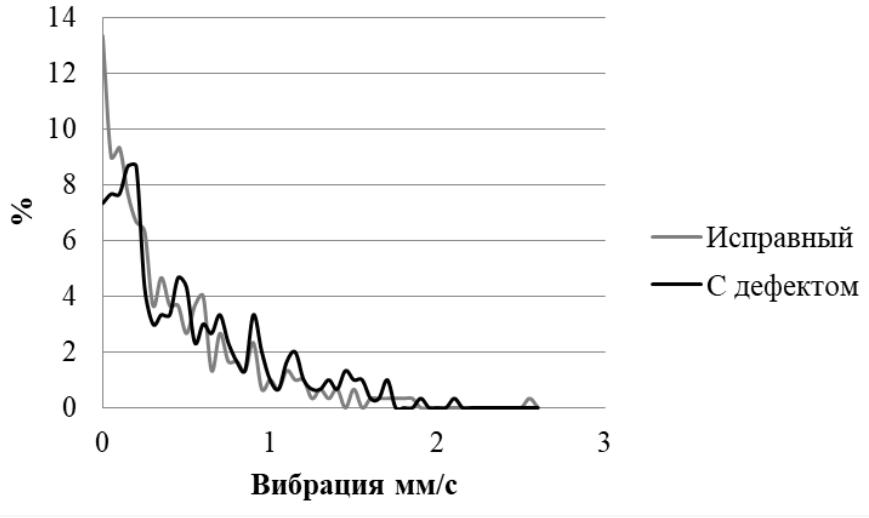


Рисунок 5. Функции распределения вероятности амплитуд вибрации привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)
Figure 5. Probability distribution functions of vibration amplitudes of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

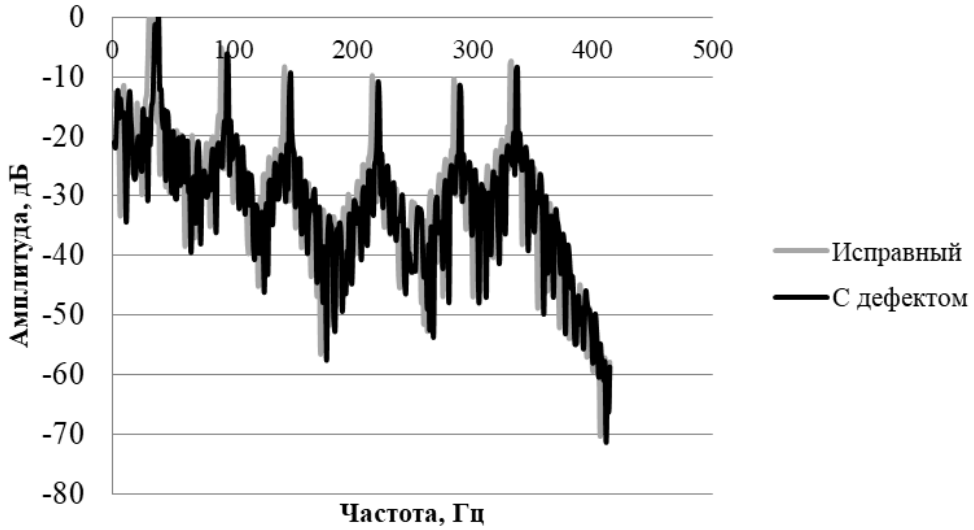


Рисунок 6. Логарифмические спектры сигналов вибрации привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)
Figure 6. Logarithmic spectra of vibration signals of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

Таким образом, предварительные исследования показывают, что существующие методы не позволяют достоверно выявлять признаки дефектов в приводе СУЗ типа АРК по его диагностическим сигналам. Требуется внедрение методов обработки исходных данных для повышения чувствительности.

Методика

Ошибки, которые наблюдаются при анализе состояния объекта (см. рис. 5), возникают в результате того, что выборки диагностических параметров, соответствующих различным состояниям, имеют близкие средние значения и широкую дисперсию. Многочисленные примеры [9-11] демонстрируют, как выборки параметров исправных и неисправных состояний перекрывают друг друга «перекрывают».

В практике обработки диагностических сигналов для усиления регулярной составляющей сигнала и ослабления выбросов, присутствующих в сигнале успешно применяется метод на основе анализа сингулярного спектра (АСС) [10-12].

Метод предполагает следующую последовательность действий:

1. Представление исходной временной последовательности сигнала исправного и состояния в виде траекторной матрицы, выражение (1):

$$[A] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_m & x_{m+1} & \dots & x_N \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где x_i – значение во временном ряду, $N = m+n-1$, n – длина окна.

$$x_1, x_2, x_3, \cdots x_N$$

За счет представления в виде траекторной матрицы обеспечивается лучшая корреляция соседних значений

2. Преобразование матрицы А в ковариационную, выражение (2):

$$[C] = \begin{bmatrix} cov(x_1, x_1) & cov(x_2, x_1) & \dots & cov(x_n, x_1) \\ cov(x_2, x_2) & cov(x_3, x_2) & \dots & cov(x_{n+1}, x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(x_m, x_m) & cov(x_{m+1}, x_m) & \dots & cov(x_N, x_m) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Чем ближе значения соседних элементов, тем больше элементы матрицы.

3. Матрица С подвергается сингулярному разложению. Сингулярное разложение позволяет разложить матрицу $[C]$ ранга L на три матрицы: $[U]$ (ортогональная матрица), $[S]$ (диагональная матрица) и $[V]^T$ (транспонированная ортогональная матрица $[V]$), выражение (3):

$$[\mathrm{C}]_{m\times n} = [U]_{m\times m}[S]_{m\times n}[V]^T_{n\times n}, \quad (3)$$

где $U^T U = I$;

$V^T V = I$;

S – диагональная матрица, содержащая квадратные корни собственных значений $\mathrm{C}^T\mathrm{C}$, которые могут быть представлены выражением (4):

$$S = diag(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_L), \quad (4)$$

где $L=min(m, n)$. Эти σ_i (i=1,2,…, L) называются собственными значениями матрицы $[C]$. Собственное число определяет значимость соответствующей ей компоненты. В рассматриваемом методе матрица V, если она получена по значениям, соответствующим исправному состоянию, рассматривается как эталонный базис. Характеристики других состояний объекта проецируются на этот базис.

Процедура обработки диагностических сигналов с использованием АСС описывается схемой на рисунке 7. Предлагаемый подход отличается от известных [10-12] наличием процедуры масштабирования, которая реализуется путем умножения матриц собственных значений на ганкельные матрицы исходных данных. За счет масштабирования должно обеспечиваться необходимое повышение чувствительности. Предполагаемое повышение чувствительности, основано на том, что собственные значения отображают структуру сигналов (соотношение периодических стохастических и трендовых составляющих), которая существенно меняется под воздействием дефекта.

Рисунок 7. Обработка виброакустических сигналов с использованием ACC
Figure 7. Processing of vibroacoustic signals using SSA

Результаты исследования

Процедура обработки диагностических сигналов с использованием ACC была применена к сигналам вибрации привода СУЗ типа АРК. В результате преобразования выражения (3) над эталонными данными был получен эталонный базис, на который проецировались все экспериментальные данные. Также в результате преобразования были получены диагональные матрицы, содержащие квадратные корни собственных значений.

В нашей интерпретации собственные значения (и их корни) трактуются как масштабные коэффициенты, обеспечивающие чувствительность при диагностировании.

Примеры графиков, иначе говоря спектров, собственных значений от номеров компонент (направлений в базисе) представлены на рисунке 8. Пример наглядно подтверждает гипотезу о том, что различие структуры диагностических сигналов исправного и неисправного оборудования может проявляться в собственных значениях ганкельных матриц сигналов.

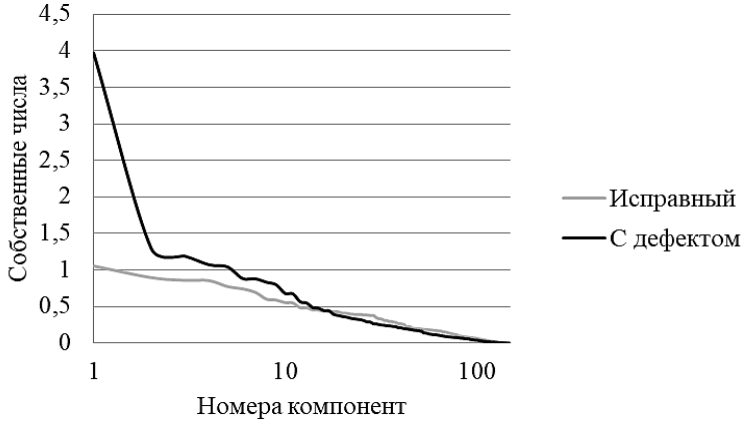


Рисунок 8. Спектр собственных значений амплитуд вибрации привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)
Figure 8. The eigenvalue spectrum of the vibration amplitudes of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

С целью обеспечения чувствительности было выполнено умножение матриц собственных значений на ганкелизованные матрицы исходных данных и проецирование результата на базис, который получился в результате преобразования выражения (3) над сигналом исправного привода. Результаты проецирования на первую компоненту представлены в виде функций распределения вероятности (рис. 9). По функциям распределения вероятности исходных параметров и функциям, полученным после обработки, были получены оценки вероятности ошибок диагностирования до и после обработки (табл. 1).

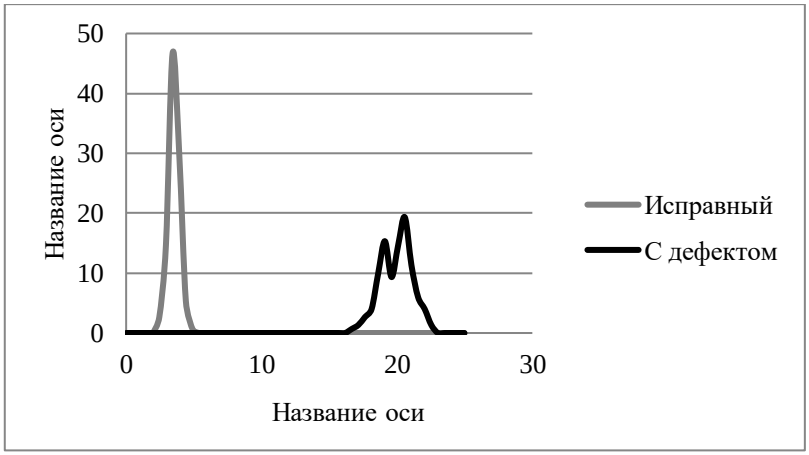


Рисунок 9. Функции распределения вероятности отмасштабированных амплитуд проекций вибрации привода СУЗ типа АРК: исправный и с дефектом (расцепление защелки магнита)
Figure 9. Probability distribution functions of the scaled amplitudes of vibration projections of the drive of the CPS type ARC: serviceable and defective (release of the magnet latch)

Таблица 1. Вероятности ошибок диагностирования до и после обработки
Table 1. Probabilities of diagnostic errors before and after processing

№	Вид дефекта	Ошибка первого рода		Ошибка второго рода	
		До обработки	После обработки	До обработки	После обработки
1	расцепление защелки магнита	49	0	33	0
2	пропуск шага	47	0	24	0
3	нарушение резьбового соединения блока перемещения	46	0	31	0
4	заедание защелки	41	0	27	0
5	износ защелок привода	50	0	23	0
6	наличие постороннего предмета в корпусе	37	0	24	0

Как видно из рисунка 9 и таблицы 1, функции плотности распределения вероятности эталонного сигнала и сигнала с дефектной составляющей не пересекаются, что говорит о высоком качестве диагностирования. Предлагаемый в статье подход к обработке диагностических сигналов легко поддается автоматизации и может быть внедрен при разработке системы диагностики привода СУЗ типа АРК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., Федоров А.И., Витковский С.Л. Некоторые аспекты повторного продления срока эксплуатации реакторной установки с ВВЭР-440 на примере энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2019;(2):91–104. https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.08

2. International Atomic Energy Agency. Safety of Nuclear Power Plants: Design. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). IAEA, Vienna (2016) (accessed: 04.12.2022).

3. Maintaining the design integrity of nuclear installations throughout their operating life. INSAG-19. A report by the international nuclear safety advisory group. URL: https://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1178_web.pdf (accessed: 04.12.2022).

4. Mazzoletti M.A., Bossio G.R., de Angelo C.H., Espinoza-Trejo D.R. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2017;(9):7218–7228. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2688973

5. 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

6. Акимо В.И., Саубанов О.М., Харисов Р.М. и др. Разработка комплексного подхода к определению технического состояния насосно-компрессорного оборудования. *Трубопроводный транспорт. Теория и практика*. 2018;(5):18–25.

7. Caesarendra W., Tjahjowidodo T. A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing. *Machines* 2017. 5. 21.

8. Гаглоева, И.Э., Добаев А.З., Дедегкаева А.А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния электроэнергетических объектов. *Инженерный вестник Дона.* 2013;(3). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1842 (дата обращения: 04.12.2022).

9. Чернов А.В., Абидова, Е.А., Хегай Л.С., Белоус М.А. Методика диагностирования состояния электромеханических приводов систем управления и защиты реакторной установки. *Инженерный вестник Дона*. 2017;(4). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4492 (дата обращения: 04.12.2022).

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. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62436-4

11. Zabalza J., Ren J., Wang Z., Marshall S., Wang J. Singular spectrum analysis for effective feature extraction in hyperspectral imaging, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2014;11(11):1886–1890. https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312754

12. Cava D.G, Palazzetti R., Trendafilova I., Fiorini C., Zucchelli A. Vibration-based delamination diagnosis and modelling for composite laminate plates. *Composite Structures.* 2015;(130):155–162. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.021

ВКЛАД АВТОРОВ:
Абидова Е.А. – разработка теории и выполнение анализа результатов экспериментов;
Поваров П.В. – планирование и проведение экспериментов;
Попов В.М. – разработка программного обеспечения для обработки результатов экспериментов;
Пугачева О.Ю. – руководство научно-исследовательской работой и проверка ее результатов;
Шпицер В.Я. – разработка и создание рукописи статьи.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
Елена Александровна Абидова, к.т.н., доцент кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0258-5543 ; e-mail: e-abidova@mail.ru

Прохор Владимирович Поваров, к.т.н., заведующий отделом НИИ атомного энергетического машиностроения, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6478-9907 ; e-mail: nii_energomash@mail.ru

Владимир Михайлович Попов, заместитель главного инженера по подготовке персонала, начальник учебно-тренировочного подразделения, Ростовская атомная

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Abidova E.A. – developed a theory and performed an analysis of the experimental results;
Povarov P.V. – planned and conducted experiments;
Popov V.M. – has developed software for processing experimental results;
Pugacheva O.Y. – supervised the work and checked its results;
Shpicer V.Ya. – developed and wrote the manuscript.

CONFLICT OF INTEREST:
The authors declares no relevant conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Elena A. Abidova, Associate Professor, Department of Information and Control Systems (после Cand. Sci. (Eng.) Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0258-5543 ; e-mail: e-abidova@mail.ru

Prokhor V. Povarov, Head of the Department of the Research Institute of Nuclear Power Engineering, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6478-9907 ; e-mail: nii_energomash@mail.ru

Vladimir M. Popov, Deputy Chief Engineer for Personnel Training, Head of the Training Department, Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC,

станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6500-5875 ; e-mail: info@vdnpp.rosenergoatom.ru

Ольга Юрьевна Пугачева, к.т.н., заместитель директора НИИ Атомного энергетического машиностроения, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9168-3008 ; e-mail: OYPugacheva@mephi.ru

Владимир Яковлевич Шпицер, д.т.н., профессор кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5051-5091 ; e-mail: VYShpitser@mephi.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022
После доработки 27.03.2023
Принята к публикации 06.04.2023

Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6500-5875 ; e-mail: info@vdnpp.rosenergoatom.ru

Olga Yu. Pugacheva, Deputy Director of the Research Institute of Nuclear Power Engineering, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9168-3008 ; e-mail: OYPugacheva@mephi.ru

Vladimir Ya. Shpicer pastedImage.png Dr. Sci. (Eng.), 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/0000-0002-5051-5091 ; e-mail: VYShpitser@mephi.ru

Received 22.12.2022
Revision 27.03. 2023
Accepted 06.04.2023

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 621.311.25:005.334
DOI 10.26583/gns-2023-02-10
EDN IAOBLO

Применение риск-ориентированного подхода при подготовке к выполнению переключений на Нововоронежской АЭС

А.А. Мозговой ✉, И.С. Рукин, А.В. Лебедева
Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Россия
✉ *MozgovoiAlA@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Аннотация. В статье рассматривается один из проблемных вопросов эксплуатации атомных станций – потери выручки, произошедшие по вине персонала. Проанализированы существующие методы и подходы по снижению количества подобных инцидентов. Несмотря на предпринимаемые усилия, проблема остаётся по-прежнему актуальной. Одним из направлений по снижению количества отказов оборудования является изучение и использования в работе внутреннего и внешнего опыта эксплуатации. Приводится описание системы предупреждения повторения негативного опыта эксплуатации, разработанной на Нововоронежской АЭС, которая используется при подготовке к выполнению переключений на оборудовании. Система представляет собой информационную базу, информация в которой структурирована по типам применяемого на Нововоронежской АЭС оборудования, что позволяет доводить до оперативного персонала только ту информацию, которая имеет непосредственное отношение к предстоящим переключениям. Рассматриваются предложения по ее дальнейшему усовершенствованию с учетом рекомендаций международного агентства по атомной энергии. Дается прогноз динамики снижения количества нарушений после внедрения этой системы в промышленную эксплуатацию.

Ключевые слова: риск, подготовка к выполнению переключений, негативный опыт эксплуатации, дифференцированный подход, нарушения, риск-менеджмент, риск-ориентированный, эксплуатация АЭС, менеджмент качества, НДП.

Для цитирования: Мозговой А.А., Рукин И.С., Лебедева А.В. Применение дифференцированного (риск-ориентированного) подхода при подготовке к выполнению переключений на Нововоронежской АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):88–96. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-10

Application of risk-based approach in switching operations preparation at Novovoronezh NPP

Aleksey A. Mozgovoj ✉, Ilya S. Rukin, Anastasiya V. Lebedeva
Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russia
✉ *MozgovoiAlA@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Abstract. The article discusses one of the problematic issues of operating nuclear power plants - revenue losses caused by staff mistakes. Existing methods and approaches to reducing the number of such incidents are analyzed. Despite the efforts made, the problem remains relevant. One of the directions for reducing the number of equipment failures is the study and use of internal and external operational experience. A description is given of a system for preventing the recurrence of negative operating experience, developed at the Novovoronezh Nuclear Power Plant, which is used in preparation for switching equipment. The system is an information base, the information in which is structured by types of equipment used at the Novovoronezh Nuclear Power Plant, allowing only the information directly related to the upcoming switches to be communicated to the operational staff. Suggestions for its further improvement, taking into account the recommendations of the International

© Мозговой А.А., Рукин И.С., Лебедева А.В., 2023

Atomic Energy Agency, are considered. A forecast is given for the dynamics of reducing the number of violations after the introduction of this system into industrial operation.

Keywords: risk, preparation for switching, negative operating experience, graded approach, nonconformities, risk management, risk-oriented, NPP operation, quality management, staff violation.

For citation: Mozgovoj A.A., Rukin I.S., Lebedeva A.V. Application of risk-based approach in switching operations preparation at Novovoronezh NPP. *Global nuclear safety.* 2023;13(2):88-96 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-10

Введение

В 2022 г. Концерн «Росэнергоатом» в очередной раз подтвердил свой статус крупнейшей энергогенерирующей компании страны, установив очередной рекорд: его филиалы – атомные станции выработали свыше 223,371 млрд. кВт.ч (для сравнения, за 2021 г. было выработано свыше 222,436 млрд. кВт.ч)[1].

Одним из факторов, оказывающий большое влияние на увеличение выработки, является выполнение мероприятий по повышению качества эксплуатации АЭС, выражающееся в снижении финансовых потерь из-за непланового изменения состава и состояния оборудования. Фактический объем недовыработки электрической энергии по инициативе АЭС (без учета генераторов, не входящих в единую энергетическую систему) в 2022 г. составил 12,609 млрд. кВт.ч., а фактический объем снижения поставки мощности из-за неготовности в 2022 г. – 0,646 млрд. кВт.ч., что в финансовом выражении эквивалентно сумме в 24 216 млн. рублей.

Статистика нарушений в работе АЭС по вине персонала

Особое внимание руководством концерна «Росэнергоатом» уделяется снижению потерь из-за нарушений, произошедших по вине персонала, являющихся одним из показателей АЭС в целях безопасности. Суммарные потери из-за нарушений, произошедших по вине персонала, в 2022 г. составили 542,188 млн. руб. или 2,2 % по отношению к общим потерям. Распределение ущерба от неправильных действий персонала по АЭС приведено на рисунке 1.

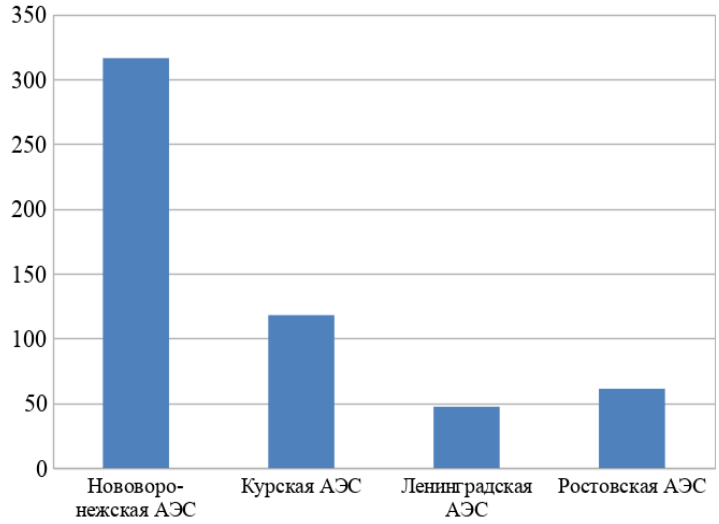


Рисунок 1. Потери от неправильных действий персонала[2], млн. руб.
Figure 1. Losses from incorrect actions of personnel, million rubles

[1] «Росэнергоатом»: АЭС России поставили в 2022 году рекорд по выработке – 223,371 млрд кВт.ч. URL: https://rosatom.ru/journalist/arkhiv-novostey/-rosenergoatom-aes-rossii-postavili-v-2022-godu-rekord-po-vyrabotke-223-371-mlrd-kvt-ch/ (дата обращения 22.03.2023).

[2] *Нарушение на Билибинской АЭС, произошедшее по вине персонала 07.08.2022, не привело к недовыработке электрической энергии.*

Как видно из рисунка 1, основным вкладчиком в потери от нарушений, произошедших по вине персонала, по итогам 2022 г. явилась Нововоронежская АЭС. На рисунке 2 изображена доля финансовых потерь Нововоронежской АЭС от нарушений, произошедших по вине персонала, что в процентном отношении составило примерно 4,5 %.

Рисунок 2. Доля финансовых потерь Нововоронежской АЭС от нарушений, произошедших по вине персонала
Figure 2. Share of financial losses of Novovoronezh NPP from violations caused by personnel

При этом количество нарушений, произошедших по вине персонала, к общему числу нарушений составило 20%, что показано на рисунке 3.

Рисунок 3. Доля нарушений на Нововоронежской АЭС, произошедших по вине персонала
Figure 3. Share of financial losses at Novovoronezh NPP from violations caused by the personnel

Таким образом, задача по снижению количества нарушений, вызванных действиями персонала, является по-прежнему актуальной.

Описание системы предупреждения повторения негативного опыта эксплуатации

Одной из возможностей по снижению количества нарушений, произошедших по вине персонала, является использование опыта эксплуатации, в том числе негативного.

Целью анализа и использования опыта эксплуатации (ОЭ) являются эффективное применение уроков, извлеченных из собственного опыта, опыта эксплуатации российских и зарубежных АЭС, предприятий традиционной электроэнергетики, атомной и др. отраслей промышленности для обеспечения / повышения безопасности, надежности и эффективности энергоблоков АЭС.

Для обеспечения использования собственного опыта на Нововоронежской АЭС реализуются следующие мероприятия:

– составление отчетов о нарушении в работе, мероприятий, приказов директора по имевшим место инцидентам на НВАЭС и их направление в подразделения для использования, в том числе и для проработки с персоналом;

– проведение повторных и внеплановых инструктажей персоналу по вопросам эксплуатации оборудования и обеспечения безопасности с использованием опыта

Нововоронежской АЭС;

– подготовка и направление в подразделения для изучения с персоналом ежегодных обзоров о нарушениях в работе блоков НВАЭС с анализом причин нарушений и рекомендаций по предотвращению повторных нарушений;

– подготовка и направление в подразделения для изучения с персоналом и использования в работе ежегодных отчетов о надежности работы оборудования НВАЭС с рекомендациями по повышению надежности работы оборудования и АЭС;

– разработка программ противоаварийных тренировок для персонала НВАЭС с учетом имевших место нарушений и опыта эксплуатации НВАЭС;

– использование опыта эксплуатации при подготовке и проведении занятий с оперативным персоналом в учебно-тренировочном пункте НВАЭС и УТЦ НВАЭС;

– внесение в установленном порядке дополнений и изменений в эксплуатационную документацию, подготовленных на основании и использованием опыта эксплуатации.

Использование в работе Нововоронежской АЭС опыта эксплуатации других АЭС проводится посредством реализации следующих действий:

– изучение с персоналом экспресс-информаций по инцидентам на других АЭС, направляемых эксплуатирующей организацией, ВНИИАЭС, ВАОАЭС-МЦ;

– оперативная информация на утреннем селекторном совещании руководителей подразделений и начальников смен АЭС об инцидентах на других АЭС (по сообщениям эксплуатирующей организации);

– выполнение организационно-технических мероприятий, разработанных на основании экспресс-информаций по инцидентам на других АЭС России;

– изучение отчетов по эксплуатации, получаемых от других однотипных АЭС руководящим персоналом АЭС, подразделений, использование отчетов при подготовке и проведении занятий с оперативным персоналом в учебно-тренировочном пункте;

– изучение руководящим персоналом АЭС, подразделений, инструкторским составом учебно-тренировочного пункта, начальниками смен АЭС отчетов и анализов по нарушениям в работе, надежности работы оборудования АЭС, направляемых на НВАЭС эксплуатирующей организацией, ВНИИАЭС, заводами-изготовителями оборудования АЭС и т.д.;

– командирование на другие АЭС работников НВАЭС по обмену опытом;

– изучение и использование в работе рекомендаций, содержащихся в отчетах, информационных письмах, направленных на НВАЭС научными, конструкторскими, проектными и другими организациями по различным вопросам деятельности АЭС;

– изучение с персоналом информационных писем, циркуляров, экспресс-информаций, направляемых на НВАЭС надзорными органами;

– участие руководящих работников АЭС и подразделений в совещаниях, проводимых эксплуатирующей организацией, в том числе по обмену опытом;

– внесение в установленном порядке дополнений и изменений в эксплуатационную документацию, подготовленных на основании и с использованием опыта эксплуатации других АЭС России

– изучение материалов по эксплуатации АЭС, опубликованных в отраслевых журналах России по энергетике и атомной энергетике;

– изучение персоналом НВАЭС на курсах повышения квалификации опыта эксплуатации АЭС.

Опыт эксплуатации зарубежных АЭС также изучается и используется на Нововоронежской АЭС путем:

– изучения персоналом экспресс-информаций по инцидентам на зарубежных АЭС, направляемых на НВАЭС ВАО АЭС и ВНИИАЭС;

– технических визитов специалистов НВАЭС по обмену опытом по линии

ВАО АЭС и двухсторонних обменов, использование отмеченного положительного опыта на НВАЭС;

– использования опыта зарубежных АЭС при подготовке и проведении занятий с оперативным персоналом в учебно-тренировочном пункте НВАЭС;

– изучения и использования положительной практики, предложенной представителями зарубежных АЭС при посещении ими НВАЭС;

– внесения в установленном порядке дополнений и изменений в эксплуатационную документацию, подготовленных на основании и с использованием опыта эксплуатации зарубежных АЭС;

– изучения материалов по эксплуатации зарубежных АЭС, опубликованных в технических журналах, издающихся в России;

– изучения отчетов и анализов по нарушениям в работе, надежности работы оборудования зарубежных АЭС, направляемых на НВАЭС ВАО АЭС, МАГАТЭ.

Вся необходимая информация об опыте эксплуатации своевременно доводится до оперативного персонала в виде инструктажей, тренировок, внесения изменений в документацию и т.п. Однако в связи огромным количеством событий, подлежащих анализу для использования перед проведением регламентных работ, оперативному персоналу необходимо держать в голове большой массив информации, что увеличивает вероятность неполного учета опыта эксплуатации и потенциально может привести к возникновению аналогичных негативных событий.

В подобных случаях в концерне Росэнергоатом в целом и на Нововоронежской АЭС в частности выполняется разработка вспомогательных информационных систем по различным областям деятельности [1,2].

Для снижения вероятности неполного использования опыта эксплуатации в данном случае на Нововоронежской АЭС разработана система предупреждения повторения негативного опыта эксплуатации перед выполнением регламентных работ на АЭС, которая позволяет оперативному персоналу в течение не более одной минуты получать информацию по имеющемуся негативному опыту эксплуатации для конкретной системы АЭС.

По запросу оператора посредством фильтра выбора событий (рис. 4) система выводит перечень информации, привязанной к конкретному оборудованию в объеме нескольких страниц структурированного печатного текста, что позволяет провести анализ имеющегося эксплуатационного опыта в течение 10 минут.

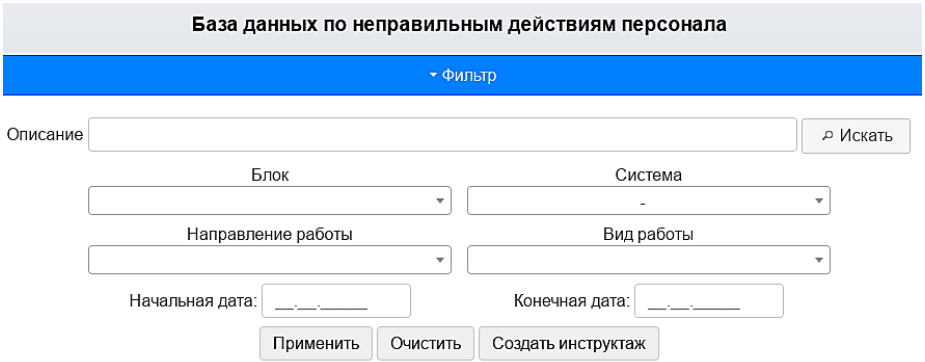


Рисунок 4. Фильтр выбора событий для анализа
Figure 4. Event selection filter for analysis

Информация в систему заносится еженедельно, что позволяет ей постоянно оставаться в актуальном состоянии и оперативно учитывать опыт эксплуатации. Эксперты по анализу событий путем проработки сотни документов из отраслевой системы СПАНД и информационного сайта ВАО АЭС собирают информацию по событиям с выделением ключевых моментов и разрабатывают рекомендуемые вопросы

для проработки при проведении целевого инструктажа с целью предупреждения негативного опыта эксплуатации (табл. 1).

Таблица 1. Перечень аналогичных событий для анализа при проведении целевого инструктажа
Table 1. List of similar events for analysis during targeted briefing

№ пп	АЭС	Дата события	Название	Система	Оборудование	Последствия
1	Название АЭС	Фактическая дата события	Описание события	Наименование системы	Наименование оборудования	Описание последствий события
2	Название АЭС	Фактическая дата события	Описание события	Наименование системы	Наименование оборудования	Описание последствий события
3	Название АЭС	Фактическая дата события	Описание события	Наименование системы	Наименование оборудования	Описание последствий события

Запрашиваемая информация об опыте эксплуатации несет в себе суть произошедшего события (краткое описание, непосредственная, коренная причина, способствующий фактор) и вопросы, которые нужно задать себе и своим подчиненным, при проведении целевого инструктажа перед проведением регламентных работ, для исключения повторения негативного события.

Применение дифференцированного подхода

В силу того, что риск допущения оперативным персоналом ошибок при выполнении переключении является частым явлением в деятельности организации, для снижения вероятности его возникновения необходимо применение риск-ориентированного подхода, главным преимуществом которого является улучшение эффективности процессов системы менеджмента качества. Происходит это путем своевременного выявления «опасных мест» процессов, что позволит в последующем избежать всевозможных потерь и предотвратить возникновение аналогичных негативных событий [3].

Кроме того, риск-ориентированный подход является неотъемлемой частью требований стандартов ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования», ГОСТ Р ИСО 14001-2016 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению»[3], что повышает актуальность внедрения данного подхода в деятельность организации [4].

Не будем заострять внимание и раскрывать детали и особенности этапов риск-менеджмента, отметим, что этот вопрос подробно рассмотрен в работе [5].

Как пример, доказывающий результативность применения риск-ориентированного мышления на практике, рассмотрим производственные риски, которые могут возникнуть при выполнении переключений:

- нарушение работы оборудования;
- снижение электрической мощности;
- недовыработка электроэнергии;
- останов энергоблока;
- производственная травма персонала;
- смертельный случай;
- облучение персонала выше пределов разрешенной дозы.

Производственные факторы риска обусловлены процессами трудовой деятельности. Производственный риск – это вероятность убытков, связанных с

[3] ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Национальный стандарт РФ. Системы менеджмента качества. Требования. ОКС 03.120.10. Дата введения 2015-11-01. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200124394 (дата обращения: 22.03.2023); ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Национальный стандарт РФ. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. ОКСТУ 0017. Дата введения 2017-03-01. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200134681 (дата обращения: 22.03.2023).

остановкой производственных процессов, нарушением технологии выполнения операций, низким качеством сырья или работы персонала [6].

Опираясь на требование НП-001-15 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» стоит отметить, что вопросам обеспечения безопасности АС, как обладающим высшим приоритетом, уделяется внимание, определяемое их значимостью[4]. С целью обеспечения безопасности документация МАТАГЭ «Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности. Общие требования безопасности. № GSR Part 2» предписывает как можно шире использовать дифференцированный подход в вопросах, связанных с управлением безопасностью [7].

Для того чтобы снизить вероятность возникновения рисков при выполнении переключений предлагается усовершенствование существующей на Нововоронежской АЭС системы предупреждения повторного негативного опыта, путем дифференцирования негативных событий по степени тяжести последствий (табл. 2).

Таблица 2. Перечень аналогичных событий для анализа при проведении целевого инструктажа, дифференцированных по степени тяжести последствий
Table 2. List of similar events for analysis during targeted briefing, differentiated by severity of consequences

№ пп	АЭС	Дата события	Название	Система	Оборудование	Последствия
1	Название АЭС	Фактическая дата события	Описание события	Наименование системы	Наименование оборудования	Степень тяжести последствий события
2	Название АЭС	Фактическая дата события	Описание события	Наименование системы	Наименование оборудования	Степень тяжести последствий события
3	Название АЭС	Фактическая дата события	Описание события	Наименование системы	Наименование оборудования	Степень тяжести последствий события

События, тяжесть последствий которых максимальна, предлагается размещать в верхней части перечня и наоборот, события, последствия которых минимальны, предлагается размещать в конце перечня. Подобный подход находит применение в самых разнообразных областях по всему миру: при обосновании безопасности малых модульных реакторов [8], в вопросах кибербезопасности [9], при анализе культуры безопасности [10], для обоснования продления эксплуатации реакторных установок [11].

Прогноз динамики нарушений при внедрении системы

Одним из инструментов оценки надежности человека-оператора является алгоритм HEART (human error assessment and reduction technique), конкретное применение которого приведено в монографии E. Calixto [12]. Исходя из предлагаемой для оценки вероятности ошибок (HEP) персонала формулы (1) возможна прогнозная оценка влияния разработанной системы на вероятность ошибок персонала:

$$HEP = GEP \prod_{i=1}^{n} (R(i)(W(i) - 1) + 1), \quad (1)$$

где GEP – номинальная вероятность ошибки;

R(i) – коэффициент важности сочетания условий ($\sum_{i=1}^{n} R(i) = 1$);

W(i) – весовой коэффициент.

Проведенный целевой инструктаж с использованием информации о негативном опыте эксплуатации как минимум нивелирует влияние приводящих к возникновению ошибок условий, перечисленных в таблице 3.

[4] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15). – URL: https://meganorm.ru/Index2/1/4293756/4293756900.htm/ (дата обращения: 22.03.2023).

Таблица 3. Перечень условий, приводящих к ошибке
Table 3. List of conditions leading to the error

№ пп	Условия, приводящие к ошибке	Вес W(i)
1	Несоответствие между воспринимаемым и реальным риском	4
2	Малый или несущественный смысл задания	1,4
3	Несогласованность того, как представляется процесс и его значимости	1,2

Таким образом, вероятность ошибок персонала, исходя из данных условий, может быть максимально снижена вплоть до четырех раз. Также для оценки риска может быть использовано более сложное программное обеспечение RiskSpectrum, которое применяется на АЭС в России и за рубежом [13]. Реальное снижение количества ошибок персонала при выполнении переключений можно будет оценить по показателю «Потери из-за нарушений, произошедших по вине персонала».

Заключение

Прошлые ошибки могут послужить ценными уроками для предотвращения их повторения, что делает опыт эксплуатации важным инструментом обеспечения безопасности. Существующий процесс информирования оперативного персонала НВАЭС об имеющемся опыте эксплуатации совместно с новой системой позволяет в полном объеме использовать накопленный опыт, минимизирует вероятность повторения негативных событий и снижает нагрузку на оперативный персонал при проведении регламентных переключений на Нововоронежской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гусев И.Н., Поваров В.П., Тучков М.Ю., Кужиль А.С., Майорова М.М., Падун С.П. О проблеме интеллектуальной поддержки операторов для современных автоматизированных систем управления технологическим процессом энергоблоков с ВВЭР. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019;(S1): 46–54. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=42880979 (дата обращения: 22.03.2023).

2. Гусев К.Ю., Виткалов К.А., Данилов А.Д., Поваров В.П. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021660371. Информационная система административно-общественного контроля за состоянием охраны труда. Заявка №2021617876 от 24.05.2021; опубл. 25.06.2021. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46481125_87493111.PDF (дата обращения: 22.03.2023).

3. Маевская К.Л. Риск-ориентированное мышление как один из методов совершенствования процесса управления рисками. В кн.: *Метрология, стандартизация и управление качеством: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции, Омск, 20–22 мая 2019 г.;* Омск: Омский государственный технический университет; 2019. С. 38–41. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=38546748 (дата обращения: 22.03.2023).

4. Лаптева О.Г., Киселева Н.В. Автоматизация процесса управления рисками на предприятиях нефтегазовой промышленности: анализ автоматизированных систем управления рисками. *Вестник науки и образования*. 2021;(5-1):5–14. URL: https://scientificjournal.ru/images/PDF/2021/108/VNO-5-108-I-.pdf (дата обращения: 22.03.2023).

5. Бадалова А.Г. Тохунц Н.Б. Регламентация процессов управления рисками в современном риск-менеджменте. *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2021;(1):118–124. URL: http://stankin-journal.ru/ru/articles/2428 (дата обращения: 22.03.2023).

6. Ерш В.С., Новиков И.А. Идентификация рисков как элемент системы управления рисками в организации. *Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности*. 2021;6(1):14–22. URL: http://openaccessscience.ru/index.php/ijcse/article/view/144 (дата обращения: 22.03.2023).

7. IAEA safety standards series № GSR Part 2. Leadership and management for safety. International atomic energy agency Vienna. 2016. URL: https://www.iaea.org/publications/11070/leadership-and-management-for-safety (дата обращения: 22.03.2023).

8. Lee K.W. The Canadian nuclear safety commission's readiness to regulate small modular reactors. CNL Nuclear Review. 2020;9(1):99-106. URL: https://www.researchgate.net/publication/342749163_THE_CANADIAN_NUCLEAR_SAFETY_COMMISSION'S_READINESS_TO_REGULATE_SMALL_MODULAR_REACTORS (дата обращения: 22.03.2023).

9. Park J.K., Park J.Y., Kim Y.K. A graded approach to cyber security in a research reactor facility. *Progress in Nuclear Energy.* 2013;(65):81–87. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.01.007

10. Ahn J., Min B.J., Lee S.J. Graded approach to determine the frequency and difficulty of safety culture attributes: The F-D matrix. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022;54(6):2067-2076.

https://doi.org/10.1016/j.net.2021.12.028

11. Karam M. Application of a graded approach to support the National Research Universal Reactor U-2 Experimental Loop Return to Service. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*. 2020;6(1): 011801. https://doi.org/10.1115/1.4044750

12. Calixto E. Gas and oil reliability engineering: modeling and analysis. Waltham (the USA): Gulf Professional Publishing; 2013. 545 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/316475215_Gas_and_Oil_Reliability_Engineering_Modeling_and_Analysis_Second_Edition

13. Vrbanic I., Samanta P., Basic I. Risk importance measures in the design and operation of nuclear power plants. ASME Press; 2017. 141 p. https://doi.org/10.1115/1.861394

ВКЛАД АВТОРОВ:
Мозговой А.А. – предоставил концептуальную основу для исследования и написал основную часть текста статьи;
Рукин И.С. – организовал эксперимент, провел статистический анализ данных, составил таблицы и графики, подготовил техническое задание на проектирование информационной системы;
Лебедева А.В. – провела исследования, предоставила полученные данные и провела анализ результатов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Mozgovoy A.A. – provided the conceptual framework for the study and wrote the bulk of the text of the article;
Rukin I.S. – organized an experiment, conducted a statistical analysis of data, compiled tables and graphs, prepared a technical task for the design of an information system;
Lebedeva A.V. – conducted research, provided data and analyzed results.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Без дополнительного финансирования.

FUNDING:
Without additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:
No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Алексей Александрович Мозговой, начальник отдела управления качеством, Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4856-6130 ; e-mail: MozgovoiAlA@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Илья Сергеевич Рукин, начальник отдела использования опыта эксплуатации и расследования нарушений, Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация; e-mail: RukinIS@ nvnpp1.rosenergoatom.ru

Анастасия Валерьевна Лебедева, инженер отдела управления качеством, Нововоронежская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1963-9655 ; e-mail: LebedevaAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Alexey A. Mozgovoy, Head of Quality Department, Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4856-6130 ; e-mail: MozgovoiAlA@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Ilya S. Rukin, Head of Operational Experience Use and Violations Investigation Department, Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation; e-mail: RukinIS@ nvnpp1.rosenergoatom.ru

Anastasia V. Lebedeva, Quality Management Engineer, Novovoronezh Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1963-9655 ; e-mail: LebedevaAV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию 24.03.2023
После доработки 26.05.2023
Принята к публикации 06.06.2023

Received 24.03.2023
Revision 26.05.2023
Accepted 06.06.2023

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 338.24: 351.862.6: 621.311.25
DOI 10.26583/gns-2023-02-11
EDN LIQSNV

Модель оценки экономической эффективности внедрения ПСР-проектов модернизации оборудования АЭС

И.А. Ухалина [1], М.В. Головко [2] ✉, С.П. Агапова [1], А.В. Анцибор [1], Н.А. Ефименко [1], Ж.С. Рогачева [1]

[1]Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия
[2]Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия
✉ *golovko178@mail.ru*

Аннотация. В данной статье обоснована актуальность разработки и реализации проектов Производственной системы «Росатом», ориентированных на модернизацию оборудования и технологических систем атомных электрических станций. Целью данных проектов является повышение энергосбережения. Рассмотрены особенности методик оценки экономической эффективности на основе поэтапного анализа показателей статистическим и динамическим методами. Определено, что процедура оценки экономической целесообразности инвестирования в ПСР-проекты по повышению энергосбережения имеет специфику в зависимости от содержания мероприятий. В связи с этим авторы рассматривают результаты, экономический и операционный эффект шести видов типовых мероприятий.

Ключевые слова: бережливое производство, энергоэффективность, модернизация оборудования, ПСР-проекты, ГК «Росатом», АЭС.

Для цитирования: Ухалина И.А., Головко М.В., Агапова С.П., Анцибор А.В., Ефименко Н.А., Рогачева Ж.С. Модель оценки экономической эффективности внедрения ПСР-Проектов модернизации оборудования АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):97–105. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-11

A model of assessing the economic efficiency of introducing Rosatom Production System projects to upgrade the NPP equipment

Irina A. Ukhalina [1], Mariy V. Golovko [2] ✉ , Svetlana P. Agapova [1], Anna V. Antsibor [1], Nina A. Efimenko [1], Zhanna. S. Rogacheva [1]

[1] Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russia
[2] I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia
✉ *golovko178@mail.ru*

Abstract. This article substantiates the relevance of the development and implementation of Rosatom Production System projects focused on the modernisation of equipment and technological systems of nuclear power plants. The purpose of these projects is to increase energy saving. The peculiarities of economic efficiency assessment methods based on stage-by-stage analysis of indicators by statistical and dynamic methods are considered. It is determined that the estimation procedure of economic feasibility of investing into Rosatom Production System projects on increasing energy saving has specificity depending on the content of measures. In this regard, the authors consider the results, economic and operational effects of six types of typical measures.

© Ухалина И.А., Головко М.В., Агапова С.П., Анцибор А.В. [и др.], 2023

Keywords: Lean production, energy efficiency, equipment modernisation, Rosatom Production System projects, Rosatom, nuclear power plants.

For citation: Ukhalina I.A., Golovko M.V., Agapova S.P., Antsibor A.V., Efimenko N.A., Rogacheva Zh.S. A model of assessing the economic efficiency of introducing Rosatom Production System projects to upgrade the NPP equipment. *Global Nuclear Safety.* 2023;13(2):97–105 (In Russ.) https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-11

Современные социально-экономические реалии актуализируют парадигму ресурсосберегающего менеджмента. Ведение бизнеса с ориентиром на сформированную и апробированную многими предприятиями концепцию бережливого производства вполне способно стать решением проблем рационального использования ограниченных ресурсов. На сегодняшний день степень разработанности указанной проблемы можно назвать достаточно широкой. Исследованы подходы, техники и технологии внедрения концепции на предприятия (как в целом, так и на примере конкретных хозяйствующих субъектов) [1,2]. Проанализированы возможности и сложности интеграции принципов бережливого производства в систему управления производственным предприятием [3]. Согласно позиции авторов статьи, эффективное управление ресурсным потенциалом в процессе производства позволяет обеспечить стабильность, независимость, конкурентоспособность – основополагающие составляющие экономической безопасности промышленных предприятий [4]. Неотъемлемым элементом концепции бережливого производства авторы также считают организацию непрерывного комплаенс-контроля для обеспечения целевого использования ресурсов и минимизации рисков, связанных с недобросовестным поведением инсайдеров [5]. Своевременное внедрение достижений научно-технического прогресса, изобретательская деятельность на производстве и другие виды инновационной активности не только дают возможность повысить экономическую эффективность деятельности, но и обеспечивают стратегическое развитие бизнеса на внутреннем и внешнем рынках [6].

Госкорпорация «Росатом», являясь лидером мирового рынка ядерных технологий и крупнейшей генерирующей компанией России, разрабатывает и реализует разные по масштабам инновационные проекты, бизнес-модели, развивает новые направления бизнеса, осуществляет непрерывную деятельность по оптимизации всех бизнес-процессов на различных участках производства, ориентируется на своевременную подготовку специалистов в соответствие с требуемыми для решения производственных задач компетенциями[1] [7]. В стратегических целях корпорации в большей степени наблюдается акцент на экстенсивный вектор развития, связанный с вводом в эксплуатацию новых объектов, в первую очередь на внешних рынках.

Вместе с тем, задачи повышения энергоэффективности и энергосбережения, как важнейшей задачи в сфере промышленного производства [8-10], надежности действующих объектов – выступают не менее важной задачей среднесрочного планирования, направленного на рост выработки, снижение затрат, достижение высокой степени устойчивости развития, что позволит реализовать одну из четырех стратегических целей повышения конкурентоспособности ГК «Росатом» на период до 2030 г. «…снижение себестоимости продукции и сроков протекания процессов»[2]. Условием реализации программы является гибкость развития путем актуализации бизнес-модели, ориентированной на максимально эффективное использование производительного, финансового, человеческого, интеллектуального, социально-репутационного и природного капитала.

[1] Итоговый отчет о результатах деятельности государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2021 год. – [Электронный ресурс]. URL: https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2021/rosatom_2021_ru.pdf

[2] Паспорт Программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года. URL: https://www.rosatom.ru/upload/iblock/705/7057d872e3bcc6bd5ddcc636f32220c0.pdf

Энергосбережение – необходимое условие повышения эффективности использования энергетических ресурсов и повышения уровня конкурентоспособности. Эффективность деятельности производственных предприятий в настоящее время обусловлена внедрением передовых ресурсосберегающих технологий [11]. Задача энергосбережения, как одна из приоритетных, поставлена и перед предприятиями ГК «Росатом». В требованиях к разработке мероприятий по модернизации оборудования и систем АЭС четко обозначена целевая установка на энергосберегающий подход [12].

В 2022 г. утверждена Программа инновационного развития и технологической модернизации Корпорации до 2030 г., целевые показатели которой представлены в таблице 1[3].

Таблица 1. Целевые значения показателей Программы энергосбережения и повышения эффективности на период 2022-2027 гг.
Table 1. Target values of the Energy Conservation and Efficiency Programme indicators for the period 2022-2027

Показатель снижения потребления энергоресурсов (в сопоставимых условиях)	Целевое значение индикатора (%) по годам					
	2022	2023	2024	2025	2026	2027
к уровню 2020 года	1	1,5	2	2,5	-	-
к уровню 2025 года	-	-	-	-	0,5	0,1

В основе модели реализации Программы лежит Производственная система «Росатома» – ПСР, ориентированная на сокращение потерь, времени протекания производственных процессов и снижение себестоимости.

Существуют различные подходы к оценке различных видов эффективности инновационных и модернизационных проектов, реализуемых на промышленных предприятиях в целом [13,14], на предприятиях атомной отрасли, в частности. При отборе, мероприятий по модернизации оборудования АЭС проходят две ступени оценки эффективности. На первом этапе решается вопрос о включении мероприятия в Комплексную долгосрочную программу-прогноз модернизации АЭС (КДПМ). Оценка проводится менее трудоемким статическим методом, позволяющим сделать долгосрочные прогнозы изменения технических и энергетических показателей работы атомной станции с определенной степенью приблизительности. Высокий уровень неопределенности будущих результатов на этом этапе характеризуется отсутствием глубокой проработки исходной информации. Но таких расчетов достаточно для оценки эффективности предлагаемого мероприятия и принятия решения о дальнейшей целесообразности его рассмотрения в качестве предмета будущих инвестиций.

Отбор проектов для их внедрения проходит два этапа. Первый этап – это оценка эффекта (абсолютного результата) от реализации мероприятия. Второй этапе – оценка эффективности инвестиций в проект.

Модель оценки экономического эффекта ПСР-проектов в виде логической схемы действий при принятии решения об отборе и включении в КДПМ мероприятия по снижению энергопотребления и повышению энергетической эффективности использования оборудования на объектах атомной энергетики представлена на рисунке 1.

[3] Паспорт Программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года. URL: https://www.rosatom.ru/upload/iblock/705/7057d872e3bcc6bd5ddcc636f32220c0.pdf

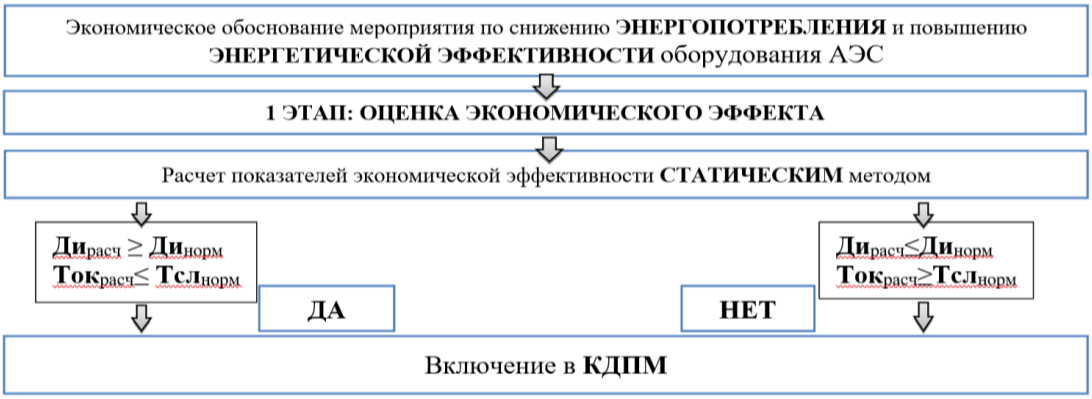


Рисунок 1. Логическая схема отбора типовых мероприятий по модернизации оборудования АЭС в КДПМ (составлено авторами)
Figure 1. Logical framework of selection of typical activities to modernise NPP equipment in a comprehensive long-term programme-forecast of NPP modernisation (compiled by the authors)

Оценка экономического эффекта основывается на сравнении показателей расчетной ($Ди_{расч}$) и установленной в качестве нормативной ($Ди_{норм}$) доходности инвестиций, а также расчетного срока окупаемости ($Ток_{рачс}$) и нормативного срока службы ($Тсл_{норм}$) объекта. Если мероприятие проходит первую ступень отбора, то принимается решение о его включении в КДПМ и финансировании, при условии положительной оценки эффективности инвестиций, рассчитанной динамическим методом. Схема оценки эффективности мероприятия с целью отбора приоритетных для инвестирования проектов представлена на рисунке 2.

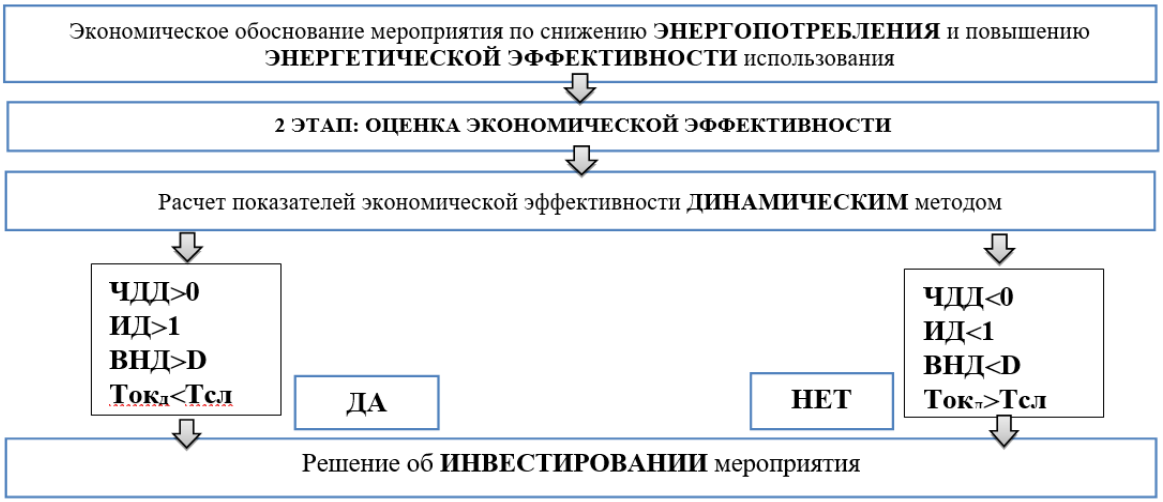


Рисунок 2. Логическая схема реализации и инвестирования типовых мероприятий по модернизации оборудования АЭС (составлено авторами)
Figure 1. Logical framework of implementation and investment of typical activities to modernise NPP equipment in a comprehensive long-term programme-forecast of NPP modernisation (compiled by the authors)

Оценка эффективности предлагаемых мероприятий определяется традиционно с помощью динамических показателей:

– дисконтированный срок окупаемости инвестиций ($Ток_{д}$), не превышающий срок службы (Тсл) объекта;

– чистая приведенная стоимость или чистый дисконтированный доход (ЧДД) – положительное значение;

– внутренняя норма доходности (ВНД), превышающая ставку дисконтирования (D) принятую концерном в качестве нормативной;

– индекс прибыльности или индекс доходности (ИД) – больше 1.

Полученные по разным проектам расчетные значения сравниваются между собой, а дисконтированный срок окупаемости с нормативным, принятым в ГК «Росатом» и ПСР-проект рекомендуется (или не рекомендуется) к реализации. Динамический метод основывается на детальном изучении проблемы, высоком уровне проработки исходной информации по технически показателям работы энергообъекта до и после внедрения модернизации, что дает возможность с высокой точностью определить срок жизненного цикла предлагаемого мероприятия.

Оценка экономической целесообразности инвестирования в ПСР-проекты по повышению энергосбережения имеет специфику в зависимости от содержания мероприятия, которые условно можно разделить на 6 типов.

Типовое мероприятие 1 (М1) «Модернизация оборудования с целью повышения КПД за счет снижения собственного потребления электрической энергии» направлено на экономию эксплуатационных расходов посредством снижения энергопотребления модернизируемым объектом.

Типовое мероприятие 2 (М2) «Модернизация оборудования с целью повышения КПД за счет внедрения мероприятий по снижению собственного потребления электрической энергии и электрической мощности» позволяет снизить расход электрической энергии на собственные нужды и высвободить электрическую мощность эксплуатируемого объекта с целью дальнейшей ее реализации.

Типовое мероприятие 3 (М3) «Мероприятие по увеличению электрической мощности энергоблока без перемаркировки его мощности» направлено на повышение электрической мощности работающего оборудования с целью дополнительного выпуска и поставки на рынок электроэнергии.

Типовое мероприятие 4 (М4) «Модернизация оборудования с целью повышения КПД за счет внедрения мероприятий по снижению собственного потребления тепловой энергии» позволит за счет модернизации котельной, работающей совместно с ТФУ АЭС снизить теплопотребление на собственные нужды. Также, отказ от теплофикационного отбора части пара из турбин на цели теплоснабжения позволит направить его энергетический потенциал на производство дополнительного объема электроэнергии и реализовать его на рынке электрической энергии и мощности.

Типовое мероприятие 5 (М5) «Модернизация оборудования, обеспечивающая совершенствование системы ТОиР и экономию трудозатрат персонала АЭС» предполагает приобретение и использование более эффективных средств труда для проведения ремонтов, что позволит сократить трудозатраты ремонтного персонала и получить экономию расходов на ремонт.

Типовое мероприятие 6 (М6) «Модернизация оборудования с целью сокращения сроков ремонта энергоблоков АЭС» направлено на сокращение сроков проведения ремонтов оборудования АЭС с помощью приобретения нового, более эффективного средства труда для проведения ремонтных работ.

Сравнительная характеристика результатов и эффектов от реализации типовых мероприятий представлена в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительная характеристика результатов и эффектов от реализации типовых мероприятий (разработано авторами по источникам [11-14])
Table 2. Comparative description of the results and effects of the model activities (developed by the authors according to sources [11-14])

Тип мероприятия	Результат реализации мероприятия	Экономический эффект	Операционный эффект
М1	↓ эксплуатационных расходов	- экономия на потреблении э/энергии на собственные нужны; - экономия затрат на покупную электроэнергию	- прирост чистой прибыли от экономии на потреблении электроэнергии; -прирост амортизации по модернизируемому объекту

Продолжение таблицы 2

Тип мероприятия	Результат реализации мероприятия	Экономический эффект	Операционный эффект
М2	↓ эксплуатационных расходов ↑ электрической мощности	- экономия на потреблении электроэнергии на собственные нужны; - экономия затрат на покупную электроэнергию; - прибыль от продажи электрической мощности	- прирост чистой прибыли от экономии на потреблении электроэнергии; - прирост чистой прибыли от продажи электрической мощности; - прирост амортизации по модернизируемому объекту
М3	↓ эксплуатационных расходов ↑электрической мощности энергоблока; ↑дополнительный выпуск и продажа э/энергии	- экономия затрат на покупную электроэнергию; - прибыль от продажи дополнительной электроэнергии	- прирост чистой прибыли от дополнительного выпуска и продажи электроэнергии; - прирост амортизации по модернизируемому объекту
М4	↓объема потребления органического топлива котельной; объемапотребления электроэнергии, обеспечивающей работу системы; ↑энергетического потенциала для производства дополнительного количества электроэнергии	- экономия на покупку органического топлива - прибыль от продажи дополнительной электроэнергии;	- прирост чистой прибыли от дополнительного выпуска и продажи электроэнергии; - прирост чистой прибыли от экономии на потреблении органического топлива; - прирост амортизации по модернизируемому объекту
М5	↓ трудозатрат на ремонт	- экономия затрат на проведение ремонта	- прирост чистой прибыли от экономии на проведение ремонтных работ; - прирост амортизации по приобретаемому средству труда
М6	↓ срока ремонта оборудования; ↑дополнительный выпуск и продажа электроэнергии	- прибыль от продажи дополнительной электроэнергии	- прирост чистой прибыли от дополнительного выпуска и продажи электроэнергии; - прирост амортизации по приобретаемому средству труда

Как видно, реализация каждого мероприятия, связанного с инвестициями в основной капитал, неизбежно связана с ростом амортизационных отчислений (включаемых в себестоимость произведенной электроэнергии) и приростом чистой прибыли при условии снижения полных затрат на производство и реализацию электроэнергии. В то время как различия в содержании проводимых мероприятий обеспечивают ряд специфических ресурсосберегающих эффектов, которые необходимо учитывать при разработке проектов.

Таблица 3. Оценочная модель экономических эффектов от внедрения типовых мероприятий по модернизации оборудования и систем АЭС
Table 3. Assessment model of economic effects from implementation of typical activities to modernise NPP equipment and systems

Показатель экономического эффекта	Тип мероприятия					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Экономия затрат на покупку э/энергии	+	+	+	-	-	-
Высвобождение мощности	-	+	-	-	-	-
Дополнительный выпуск э/энергии	-	-	+	+	-	+
Снижение трудозатрат при проведении ТО и Р	-	-	-	-	+	+
Прирост амортизации и налога на имущество	+	+	+	+	+	+
Прирост чистой прибыли	+	+	+	+	+	+

Рассматриваемая модель оценки позволяет осуществлять отбор наиболее значимых ПСР-проектов, обеспечивающих рост эффективности эксплуатации оборудования АЭС, энергосбережения и энергоэффективности работы станции, ее конкурентоспособности и устойчивости развития. В то же время, практическое значение предлагаемой модели состоит в том, что она может быть встроена в учебный процесс подготовки lean-специалистов для атомной отрасли. Это позволит сформировать актуальные компетенции у будущих и действующих сотрудников, вооружив их релевантными навыками для реализации стратегии ресурсосбережения на основе современных методик и прогрессивного опыта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Korsakov D.V. Project management for the implementation of lean manufacturing at an industrial enterprise. *Student Scientific.* 2022;(1):29–40. https://doi.org/10.47451/tss2022-01-03

2. Золотухин, В.А., Архипова Я.Л. Отечественный опыт внедрения проекта системы бережливого производства. В кн.: *Гуманитарное знание: Сборник научных статей*. Санкт-Петербург : Центр научно-информационных технологий «Астерион»; 2020. С. 27–32.

3. Давыдова Н.С., Гращенкова Н.В. Система менеджмента бережливого производства и устойчивость лин-трансформаций. *Новые технологии.* 2021;17(2):121–130. https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-2-121-130

4. Яковлева А.В., Алабердеев Р.Р., Андросов С.М. и д]. Механизм экономико-правового обеспечения национальной безопасности: опыт, проблемы, перспективы. Краснодар: Научно-исследовательский институт экономики; 2012. 537 с. ISBN 978-5-9952-0017-8.

5. Головко М.В., Сетраков А.Н., Агапова С.П. и др. К вопросу об эффективности комплаенс-контроля на предприятиях атомной отрасли в условиях экономического кризиса. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;(1):110–117. https://doi.org/10.26583/gns-2021-01-10

6. Golovko M.V., Rudenko V.A., Krivoshlykov N.I. Influence of institutional transformations on the choice of mechanisms for ensuring economic development and security of nuclear power engineering enterprises. *Espacios.* 2018. Vol. 39. No. 31. EDN VBDQUS. URL: https://www.revistaespacios.com/a18v39n31/18393128.html (дата обращения: 24.02.2023).

7. Руденко В.А., Головко М.В., Ухалина И.А. и др. Опыт и перспективы подготовки lean-специалистов на основе эффективного взаимодействия вуза и предприятий ГК «Росатом». *Глобальная ядерная безопасность*. 2018;(1):119–128. URL: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2018.1.4.2.pdf (дата обращения: 24.02.2023).

8. Акулова Я.Н. Энергоэффективность как способ повышения конкурентоспособности экономики. *Управление экономическими системами. Электронный научный журнал.* 2015;(78). EDN: XEBZQZ. URL: http://uecs.ru/uecs-78-782015/item/3614-2015-06-29-08-07-33 (дата обращения: 24.02.2023).

9. Зверев А.В. Энергоэффективность и энергосбережение: мировой опыт для России [монография]. Москва: Статистика России. 2011. 176 с.

10. Галиева Д.А., Иванова Е.Г., Конников Е.А., Конникова О.А. Принципы формирования эффективных проектов в области повышения энергоэффективности деятельности предприятия. *Экономические науки.* 2020;(188):37–42. https://doi.org/10.14451/1.188.37

11. Положенцева Ю.С., Андросова И.В. Приоритеты технологической модернизации промышленного предприятия в условиях трансформации экономики. *Russian Economic Bulletin.*

2021;4(5):214–221. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_47320530_56831643.pdf (дата обращения: 07.03.2023).

12. Румненко М.С. Lean Smart Plant – новый уровень развития производственной системы «Росатом». В кн.: *Повышение производительности труда на транспорте – источник развития и конкурентоспособности национальной экономики : Труды V Всероссийской научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2021 года.* Москва: Гуманитарный институт ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»; 2021. С. 18–20. – EDN DOYLWM.

13. Наркевич Л.В., Казанский А.В. Системный подход к оценке эффективности инвестиционного проекта. *Экономический журнал.* 2020;(2):47–60. URL: http://www.economicarggu.ru/2020_2/58.pdf (дата обращения: 07.03.2023).

14. Багаутдинов Н.Х., Каландаров Д.Н. Методика оценки эффективности инновационных проектов в области модернизации промышленных производств. В кн.: *Современные научные исследования: теория, методология, практика : Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции (13 июня 2019 г., г. Уфа). В 3 ч. Ч. 2.* Уфа: НИЦ Вестник науки; 2019. С. 76–83. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_41095403_19235055.pdf (дата обращения: 07.03.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:
Ухалина И.А. – Установление взаимосвязи между содержанием мероприятия по энергосбережению, экономическим результатом и операционным эффектом от его реализации;
Головко М.В. – Концептуализация статьи, предоставление материалов авторских исследований по изучаемой проблеме;
Агапова С.П. – Систематизация критериев отбора мероприятий по модернизации объектов АЭС для целей включения в КДПМ и принятия решения о приоритетности их инвестирования;
Анцибор А.В. – Составление логических схем отбора типовых мероприятий по модернизации АЭС и принятии решения об их инвестировании;
Ефименко Н.А. – Составление оценочной модели экономических эффектов от внедрения типовых мероприятий по модернизации оборудования АЭС;
Рогачева Ж.С. – Изучение, обработка и систематизация публикаций по изучаемой проблеме.

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Ukhalina I.A. – Establishing the relationship between the content of the energy saving activity, the economic result and the operational effect of its implementation;
Golovko M.V. – Conceptualization of the article, provision of author's research materials on the problem under study;
Agapova S.P. – Systematization of criteria of selection of activities on modernization of NPP facilities for the purposes of inclusion into a comprehensive long-term programme-forecast of NPP modernisation and making decision on priority of their investment;
Antsibor A.V. – Making logical schemes of selecting typical activities to modernise NPPs and making a decision on their investment;
Efimenko N.A. – To make an estimated model of economic effects from implementation of typical activities on modernisation of NPP equipment;
Rogacheva Zh.S. – Study, processing and systematisation of publications on the problem.

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:
Ирина Анатольевна Ухалина, 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/0000-0002-1928-7510 ; e-mail: IAUkhalina@mephi.ru
Мария Владимировна Головко, д.э.н., профессор кафедры институциональной экономики и инвестиционного менеджмента, Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4835-9800 ; e-mail: golovko178@mail.ru
Светлана Павловна Агапова, старший преподаватель 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/0000-0002-8484-2912 ; e-mail: SPAgapova@mephi.ru
Анна Васильевна Анцибор, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Irina A. Ukhalina, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics, Social and Humanitarian Disciplines Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1928-7510 ; e-mail: IAUkhalina@mephi.ru
Mariy V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Institutional Economics and Investment Management, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4835-9800 ; e-mail: golovko178@mail.ru
Svetlana P. Agapova, Senior Lecture, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8484-2912 ; e-mail: SPAgapova@mephi.ru
Anna V. Antsibor, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1192-4554 ; e-mail: AVAntsibor@mephi.ru

Нина Алексеевна Ефименко, 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/0000-0001-8113-6759 ; e-mail: NAEfimenko@mephi.ru

Жанна Сергеевна Рогачева, 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/0000-0002-3363-2691 ; e-mail: ZSRogacheva@mephi.ru

Поступила в редакцию 14.03.2023
После доработки 12.05.2023
Принята к публикации 23.05.2023

DisciplinesVolgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1192-4554 ; e-mail: AVAntsibor@mephi.ru

Nina A. Efimenko, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8113-6759 ; e-mail: NAEfimenko@mephi.ru

Zhanna S. Rogacheva, Cand. Sci. (EconAssociate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3363-2691 ; e-mail: ZSRogacheva@mephi.ru

Received 14.03.2023
Revision 12.05.2023
Accepted 23.05.2023

.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Abidova E.A.	77
Abrosimov A.D.	6
Agapova S.P.	97
Antsibor A.V.	97
Burdakov S.M.	31
Chernov E.V.	56
Dushev S.A.	6
Efimenko N.A.	97
Golovko M.V.	97
Gorbunov P.A.	6
Gorskaya O.Yu.	14
Grachev A.S.	66
Ivanyi M.B.	39
Kozlov A.V.	39
Kravets S.B.	50
Kuzin S.A	50
Lapkis A.A.	66
Lebedeva A.V.	88
Lobarev A.L.	56
Malev V.V.	6
Molev I.A.	56
Mozgovoj A.A.	88
Plotnikov D.A.	56
Popov E.O.	24
Popov V.M.	77
Postoy L.V.	31
Povarov P.V.	77
Pugacheva O.Yu.	77
Rogacheva Zh.S.	97
Rukin I.S.	88
Salnikova N.A.	6
Shcherbakov A.A.	39
Shcherban A.S.	39
Shmelev I.V.	6
Shpicer V.Ya.	77
Smolin A.Yu.	66
Solovyev D.A.	56
Surin V.I.	39
Tagirova T.A.	6
Tahash H.A.	56
Tkachev V.G.	31
Tomilin S.A.	39
Tsuverkalova O.Yu.	31
Ukhalina I.A.	97
Zagrebaev A.M.	24
Zayarov Yu.V.	31
Zhidkov M.E.	39

AUTHOR INDEX

Абидова Е.А.	77
Абросимов А.Д.	6
Агапова С.П.	97
Анцибор А.В.	97
Бурдаков С.М.	31
Головко М.В.	97
Горбунов П.А.	6
Горская О.И.	14
Грачёв А.С.	66
Душев С.А.	6
Ефименко Н.А.	97
Жидков М.Е.	39
Загребаев А.М.	24
Заяров Ю.В.	31
Иваний М.Б.	39
Козлов А.В.	39
Кравец С.Б.	50
Кузин С.А.	50
Лапкис А.А.	66
Лебедева А.В.	88
Лобарев А.Л.	56
Мальев В.В.	6
Мозговой А.А.	88
Молев И.А.	56
Плотников Д.А.	56
Поваров П.В.	77
Попов В.М.	77
Попов Е.О.	24
Постой Л.М.	31
Пугачева О.Ю.	77
Рогачева Ж.С.	97
Рукин И.С.	88
Сальникова Н.А.	6
Смолин А.Ю.	66
Соловьёв Д.А.	56
Сурин В.И.	39
Тагирова Т.А.	6
Танаш Х.А.	56
Ткачев В.Г.	31
Томилин С.А.	39
Ухалина И.А.	97
Цуверкалова О.Ф.	31
Чернов Е.В.	56
Шмелев И.В.	6
Шпицер В.Я.	77
Щербаков А.А.	39
Щербань А.С.	39

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(!) Обращаем внимание авторов: с 31 мая 2023 г. обновлены требования к оформлению статей с целью расширения международной аудитории журнала.

Полный текст статьи для опубликования должен быть оригинальным – не более 20% заимствований, сопровождаться экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, соответствовать приведенным ниже правилам оформления.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- индекс УДК;
- название на русском и английском языках;
- инициалы и фамилия авторов на русском и английском языках;
- аффилиация для каждого автора на русском и английском языках;
- структурированная по IMRAD аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- текст статьи;
- объединенный Список литературы / References (см. пример оформления);
- сведения об авторах (для каждого автора – Фамилия Имя Отчество, место/а работы, должность/и, ученая степень, звание, электронный адрес, индекс ORCID (http://orcid.org), телефон контактного автора) на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована: введение (актуальность темы; обзор проблемы; цель работы); методология (теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов; описание материалов и методов анализа; статистическая обработка); результаты и их обсуждение; заключение (выводы). Цель и ключевые результаты работы должны быть понятно представлены в аннотации и тексте статьи, научная новизна работы обоснована во введении со ссылкой на источники, опубликованные в научных рецензируемых изданиях (в том числе зарубежных) последних нескольких лет. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы и полученные результаты.

Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и упоминаться в тексте статьи непосредственно перед самими формулами.

Включение таблиц в статью должно быть целесообразным, сопровождаться нумерацией, заголовками на русском и английском языках (10 пт) и ссылками в тексте непосредственно перед самими таблицами.

Рисунки должны быть понятными при черно-белой печати, 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 URL, по которым их можно найти в Интеренете. Доклады конференций могут быть включены в список литературы, если они доступны в Интернете, при этом указывается URL 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 oni-viti@mephi.ru:

- согласие на обработку персональных данных;
- файл со статьей в формате Word;
- итоговый (после доработки) файл в формате pdf с подписью авторов;
- файл со статьей в формате pdf для слепого рецензирования;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Киркин А.М., Курындин А.В., Синегрибов С.В. и др. Проблема моделирования геометрии крестообразных витых твэлов при проведении теплогидравлических расчетов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(1):23–35. 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 ol. 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. Рашитов П.А., Серегин Д.А., Аникин М.Д., Вершанский Е.А. Применение многоуровневых инверторов напряжения в распределенных устройствах продольной компенсации. *Вестник МЭИ.* 2021;3:58–66. https://doi.org/10.24160/1993-6982-2021-3-58-66

7. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Патент № 2675380 C1 Российская Федерация, МПК G21C 7/00. Способ маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. Заявка №2018117898 от 15.05.2018; опубл. 19.12.2018. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002675380_20181219_C1_RU/ (дата обращения: 26.03.2023).

8. Алвахеба А. И., Сурин В.И., Бекетов В.Г., Иванов О.В., Иванова Т.Е. Сравнительный анализ результатов радиографического и электрофизического неразрушающего контроля сварных соединений модельных образцов. В кн.: *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2018): Труды XVIII Международной молодежной конференции.* Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2018. С. 179-180. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36979736_11029641.pdf (дата обращения: 06.03.2023). EDN: YXJYAH

9. Vrbanic I., Samanta P., Basic I. Risk importance measures in the design and operation of nuclear power plants. ASME Press; 2017. 141 p. https://doi.org/10.1115/1.861394

10. 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. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052061

Адрес редакции журнала:
347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», oni-viti@mephi.ru
Выпускающий редактор: Лобковская Надежда Ивановна, +79281883628, NILobkovskaya@mephi.ru

NOTES FOR AUTHORS

(!) Please, pay attention: the article formatting requirements have been updated in order to expand the international readership of the journal since May, 31st 2023.

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 when printing in black and white, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions.

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 ol. 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. 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. URL: 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. URL: 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