Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Глобальная ядерная безопасность

(научно-практический журнал)

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

Том 14, № 4 (53), 2024

Журнал включен в перечень ВАК РФ (1064)
Группы научных специальностей:
1.2 Компьютерные науки и информатика
2.2 Электроника, фотоника, приборостроение и связь
2.4 Энергетика и электротехника
5.2 Экономика

Главный редактор:
Михаил Николаевич Стриханов, доктор физ.-мат. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Заместитель главного редактора:
Валентина Анатольевна Руденко, доктор соц. наук, профессор, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Выпускающий редактор:
Надежда Ивановна Лобковская, канд. филос. наук, НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Редакционная коллегия:
Владимир Петрович Поваров, доктор техн. наук, Нововоронежская АЭС, *Российская Федерация*

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

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

Лю Дамин, профессор, Китайский институт ядерной энергетики, *Китай*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Компьютерная верстка:
Ольга Юревна Васильева, инженер издательско-полиграфического сектора, ВИТИ НИЯУ МИФИ, *Российская Федерация*

Регистрация СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 11 ноября 2011 года (Свидетельство ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г. – печатное издание). Первый номер журнала вышел в декабре 2011 года
Периодичность:	4 номера в год
Учредитель и издатель:	Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Адрес редакции:	115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
Типография:	ИПС ВИТИ НИЯУ МИФИ, 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Сайт:	https://glonucsec.elpub.ru/jour/index
Тираж:	300 экз.
Цена:	Свободная
Подписной индекс:	10647 (объединенный каталог «Пресса России»)
Выход в свет:	20.12.2024

Москва

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2024

National Research Nuclear University MEPhI

Global Nuclear Safety

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

Vol. 14, No. 4, 2024

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Executive Editor:

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

Editorial Staff:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Computer layout:

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

Founded in November, 2011	Reg. № FS77-47155, November, 3 2011
Quarterly	
Founder and Publisher:	National Research Nuclear University MEPhI
Editorial address:	Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russian Federation
Printing house:	PPS VETI NRNU MEPhI, Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russian Federation
Website:	https://glonucsec.elpub.ru/jour/index
The circulation is:	300 copies
The price:	Is free
The subscription index is:	10647 in the catalogue «Press of Russia»
Published on:	20.12.2024

Moscow

National Research Nuclear University MEPhI, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Том 14, № 4 (53), 2024

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Исследование воздействия физико-химических факторов при коррекционной обработке дебалансных вод АЭС с целью обеспечения соответствия кондиционированных радиоактивных отходов нормативным требованиям
В.П. Поваров, С.В. Росновский, Э.С. Мельников, М.Н. Литовченко, В.С. Росновский, Е.Л. Гордеева, А.Н. Харин, Х.С. Шихалиев, М.А. Потапов 5

Оценка технического состояния малогабаритной ядерной энергетической установки после опрокидывания транспортного агрегата
О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе 19

Особенности и способы защиты от техногенного акустического фона, влияющего на характер γ-спектров при проведении измерений КГС
А.И. Маджидов, С.Е. Улин, А.П. Елохин, А.Е. Шустов 27

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Градиентный метод идентификации структурных неоднородностей в электрическом контроле оборудования, изделий и материалов
В.И. Сурин, М.Б. Иваний, А.А. Щербаков, А.С. Щербань, А.В. Павличенко, С.А. Томилин, М.Е.Жидков, А.Э. Гоок 34

Исследование математических моделей упругопластических материалов
А.И. Балябин, С.И. Герасимов, Д.А. Ладин, С.А. Маскайкин, Д.Ю. Смирнов, Т.С. Шаброва 42

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЬЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Нейтронно-шумовые методы контроля активных зон ВВЭР
Г.В. Аркадов, М.Т. Слепов 55

Диагностика состояний активной зоны ВВЭР-1000 по реактивностным возмущениям
В.Я. Шпицер, В.В. Кривин. 71

Анализ погрешности тарировки электропривода запорной арматуры АЭС
А.А. Лапкис, Л.В. Цыхлер, В.Н. Никифоров, В.П. Егорова 80

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

Перспективы развития атомграда под влиянием агломерационных процессов на территории присутствия ГК «Росатом»
В.А. Руденко, И.А. Ухалина, А.В. Анцибор, Н.А. Ефименко, М.В. Головко 91

Авторский указатель номера 4 (53), 2024 101

CONTENTS

Vol. 14, No 4, 2024

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

Investigation of the impact of the physical and chemical factors during correction treatment of NPP unbalance water to ensure compliance of conditioned radioactive waste with regulatory requirements
V.P. Povarov, S.V. Rosnovsky, E.S. Melnikov, M.N. Litovchenko, V.S. Rosnovsky, E.L. Gordeeva, A.N. Kharin, H.S. Shikhaliev, M.A. Potapov 5

Technical condition assessment of a small-sized nuclear power plant after transportation unit overturning
O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze 19

Features and methods of protection from anthropogenic acoustic background, influencing the character of γ-spectra during measurements by xenon γ-spectrometer
A.I. Majidov, S.E. Ulin, A.P. Elokhin, A.E. Shustov 27

DESIGN, MANUFACTURING AND COMMISSIONING OF NUCLEAR INDUSTRY EQUIPMENT

Gradient method of structural heterogeneity identification in electrical inspection of equipment, products and materials
V.I. Surin, M.B. Ivanov, A.A. Shcherbakov, A.S. Shcherban, A.V. Pavlichenko, S.A. Tomilin, M.E. Zhidkov, A.E. Gok 34

Study of mathematical models of elastoplastic materials
A.I. Balyabin, S.I. Gerasimov, D.A. Ladin, S.A. Maskaikin, D.Y. Smirnov, T.S. Shabrova 42

OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

Neutron noise control techniques for VVER core
G. V. Arkadov, M. T. Slepov 55

Diagnostics of VVER-1000 core states by reactivity perturbations
V.Ya. Shpitser, V.V. Krivin 71

Analysis of calibration error of NPP shut-off valve electric drive
A.A. Lapkis, L.V. Tsykhler, V.N. Nikiforov, V.P. Egorova 80

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

Prospects of atom city development under the influence of agglomeration processes in the territory of Rosatom's presence
V.A. Rudenko, I.A. Ukhalina, A.V. Antsibor, N.A. Efimenko, M.V. Golovko 91

Author Index of 4, 2024 101

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

УДК УДК 628.4.047 : 621.311.25
https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01
EDN FNSFJI
Оригинальная статья / Original paper

Исследование воздействия физико-химических факторов при коррекционной обработке дебалансных вод АЭС с целью обеспечения соответствия кондиционированных радиоактивных отходов нормативным требованиям

В.П. Поваров[1], С.В. Росновский[1] ✉, Э.С. Мельников[1], М.Н. Литовченко[1], В.С. Росновский[1], Е.Л. Гордеева[2], А.Н. Харин[3], Х.С. Шихалиев[4], М.А. Потапов[3]
[1]*Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», Воронежская обл., г. Нововоронеж, Российская Федерация*
[2] *ООО «Атом-Инфо», Воронежская обл., город Нововоронеж, Российская Федерация*
[3]*Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронежская обл., г. Воронеж, Российская Федерация*
[4]*Воронежский государственный университет, Воронежская обл., г. Воронеж, Российская Федерация*
✉ *RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Аннотация. Приведены результаты исследования процессов разложения поверхностно-активных веществ (ПАВ) в дебалансных водах атомных электростанций посредством коррекционной обработки перекисью водорода с последующим нагревом. Предложена методика определения вида и концентрации ПАВ в водных растворах на основе метода высокоэффективной жидкостной хроматографии в тандеме с масс-спектрометрией (ВЭЖХ-МС). Исследованы зависимости эффективности очистки раствора от исходной концентрации ПАВ, времени и температуры, а также от наличия дополнительного контаминатора (перманганата калия). Показано, что для обеспечения требований нормативных документов, при консервативном подходе, эффективность очистки от ПАВ должна составлять не менее 81 % при упаривании кубового остатка перед направлением на цементирование до 150 г/л и не менее 95 % – при упаривании до 450 г/л. Показано, что при дозировании пероксида водорода в водные растворы, разложение комплексообразующих веществ происходит в процессе переработки в диапазоне температур 80-100 градусов Цельсия. При температурах 80 °С и выше концентрация ПАВ достигает значения 62 %, что соответствует не превышению содержания ПАВ в кубовом остатке значения 1% (без консервативного подхода), после 4 часов обработки. Дозирование перманганата калия в очищаемую воду позволяет достичь фактически 100 %-ной очистки от ПАВ, не прибегая к нагреву воды до температуры кипения. Эффективность очистки от ПАВ до уровня содержания комплексообразующих веществ в кубовом остатке в пределах ниже 1 % достигается при дозировании перманганата калия спустя 70 мин после начала эксперимента, а при нагреве до 100 °С – менее, чем за 40 мин. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании безопасности технологий обращения с РАО, применяемых в атомной энергетике.

Ключевые слова: дебалансные воды, пероксид, коррекционная обработка, высокоэффективная жидкостная хроматография, масс-спектрометрия, поверхностно-активные вещества, перманганат калия, АЭС.

Для цитирования: Поваров В.П., Росновский С.В., Мельников Э.С., Литовченко М.Н., Росновский В.С., Гордеева Е.Л., Харин А.Н., Шихалиев Х.С., Потапов М.А. Исследование воздействия физико-химических факторов при коррекционной обработке дебалансных вод АЭС с целью обеспечения соответствия кондиционированных радиоактивных отходов нормативным требованиям. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):5–18. https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01

For citation: Povarov V.P., Rosnovsky S.V., Melnikov E.S., Litovchenko M.N., Rosnovsky V.S., Gordeeva E.L., Kharin A.N., Shikhaliev H.S., Potapov M.A. Investigation of the impact of the physical and chemical factors during correction treatment of NPP unbalance water to ensure compliance of conditioned radioactive waste with regulatory requirements. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):5–18. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-01

© Поваров В.П., Росновский С.В., Мельников Э.С. и др., 2024

Investigation of the impact of the physical and chemical factors during correction treatment of NPP unbalance water to ensure compliance of conditioned radioactive waste with regulatory requirements

Vladimir P. Povarov[1], Sergey V. Rosnovskiy[1] ✉, Eduard S. Melnikov[1], Mikgail N. Litovchenko[1], Victor S. Rosnovskiy[1], Elena L. Gordeeva[2], Alexey N. Kharin[3], Khidmet S. Shikhaliev[4], Mikhail A. Potapov[3]

[1] *Novovoronezh NPP the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Voronezh region, Novovoronezh, Russian Federation*
[2] *Atom-Info LLC, Voronezh region, Novovoronezh, Russian Federation*
[3] *Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh region, Voronezh, Russian Federation*
[4] *Voronezh State University, Voronezh region, Voronezh, Russian Federation*
✉ *RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Abstract. The paper considers the results of a study of the decomposition of surfactants in the unbalanced waters of nuclear power plants by corrective treatment with hydrogen peroxide followed by heating. It proposes a method of determining the type and concentration of surfactants in aqueous solutions based on the method of high-performance liquid chromatography in tandem with mass spectrometry (HPLC-MS). The dependences of the purification efficiency of the solution on the initial concentration of surfactants, time and temperature as well as on the presence of an additional contaminant (potassium permanganate) are investigated. It is shown that in order to meet the requirements of regulatory documents with a conservative approach the efficiency of surfactant purification should be at least 81% when evaporating the cubic residue before cementing to 150 g/l and at least 95 % when evaporating to 450 g/l. Decomposition of complexing agents is shown to occur during processing in the temperature range of 80-100 degrees Celsius when hydrogen peroxide is dosed into aqueous solutions. The surfactant concentration reaches a value of 62 % at temperatures of 80 C and above which corresponds to the surfactant content in the cube residue not exceeding the value of 1 % (without conservative approach) after 4 hours of treatment. Dosing of potassium permanganate into the purified water allows to achieve virtually 100% purification from surfactants, without resorting to heating the water to boiling point. The efficiency of purification from surfactants to the level of complexing substances in the cubic residue in the range below 1 % is achieved by dosing potassium permanganate 70 minutes after the start of the experiment, and when heated to 100 C – in less than 40 minutes. The results obtained can be used to substantiate the safety of radioactive waste management technologies used in nuclear energy.

Keywords: unbalanced waters, peroxide, correction treatment, high-performance liquid chromatography, mass spectrometry, surfactants, potassium permanganate, nuclear power plants.

Постановка задачи

В соответствии с требованиями нормативных документов[1,2] на энергоблоках АЭС российского дизайна применяются технологии переработки и кондиционирования дебалансных вод, основанные на методах упаривания, сорбции, цементирования и др.

При этом химический состав дебалансных вод характеризуется широким спектром загрязнителей, в число которых, как правило, входят поверхностно-активные вещества (далее – ПАВ). ПАВ применяются при стирке спецодежды, дезактивации оборудования, помещений и т.д.

В соответствии с требованиями нормативных документов в области использования атомной энергии[1,2,3] при переработке и кондиционировании жидких радиоактивных отходов должны применяться методы, исключающие наличие в конечном продукте

[1] Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-019-2015. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 июня 2015 г. № 242. – Информационно-правовое обеспечение ГАРАНТ. – Режим доступа: https://base.garant.ru/71149074/ (дата обращения: 01.11.2024).

[2] Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-093-14. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 г. № 572. – Режим доступа: https://base.garant.ru/70929586/ (дата обращения: 01.11.2024).

[3] Рекомендации по порядку, объемам, методам и средствам контроля радиоактивных отходов в целях подтверждения их соответствия критериям приемлемости для захоронения. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. РБ-155-2020. – Режим доступа: https://docs.secnrs.ru/documents/rbs/РБ-155-20/РБ-155-20.pdf (дата обращения: 01.11.2024).

комплексообразующих веществ в количествах, превышающих установленные нормативные значения.

В соответствии с пунктом 19 НП-093-14, «содержание комплексообразующих веществ, которые могут образовывать растворимые в воде соединения с радионуклидами (комплексные соединения), обладающие повышенной подвижностью, должно быть исключено или ограничено таким образом, чтобы ограничить выход радионуклидов из упаковки РАО пределами, установленными в соответствии с настоящими федеральными нормами и правилами».

Содержание комплексообразующих веществ должно контролироваться для всех классов РАО (Приложение 2 к НП-093-14). При этом для РАО 2, 3, 4 классов непосредственно установлены численные ограничения по допустимому содержанию комплексообразующих веществ – «Не более 1 % от массы радиоактивного содержимого упаковки РАО» (Приложение 1 к НП-093-14).

Указанные ограничения обусловлены тем, что наличие в РАО поверхностно-активных веществ, во-первых, резко увеличивает скорость миграции радионуклидов в окружающей среде при разрушении радиационных упаковок; во-вторых, наличие ПАВ может существенно увеличивать скорость выщелачивания радионуклидов из цементной матрицы[4] [1,2]. Цементирование жидких радиоактивных отходов, как способ их подготовки к длительному хранению, используется во многих странах мира[5]. Каждый отход должен подвергаться различным испытаниям, например, устойчивости к выщелачиванию, разрушению [3]. Наличие ПАВ в цементе также приводит к уменьшению скорости его затвердевания [4]. Большинство макрокомпонентов радиоактивных отходов не являются инертными наполнителями, а могут вступать во взаимодействие с вяжущим материалом, влияя на качество конечного продукта [5].

Одним из способов очистки от ПАВ дебалансных вод, образующихся на энергоблоках 1-2 НВАЭС-2, является коррекционная обработка пероксидом водорода с последующим нагревом.

При проведении экспертиз безопасности в ходе прохождения лицензионных процедур Нововоронежской АЭС были получены рекомендации о необходимости дополнительного обоснования эффективности технологии очистки вод спецпрачечной от ПАВ путем коррекционной обработки пероксидом водорода с последующим нагревом с учетом наличия дополнительных видов загрязнений, не свойственных для дебалансных вод других отраслей промышленности, в частности, радиоактивных загрязнений, возможности наличия следов перманганата калия и т.д.

Известен ряд исследований, направленных на изучение механизмов взаимодействия ПАВ с пероксидом водорода в водных и органических средах [6].

Композиции «катионные ПАВ (далее – КПАВ) – гидропероксид» образуют динамические коллоидные системы, генерирующие свободные радикалы как в органической, так и в водных средах.

Генерирование радикалов в системе «КПАВ-гидропероксид» происходит благодаря каталитическому действию КПАВ, заметно уменьшающему энергию активации радикального распада гидропероксида.

Основными факторами, влияющими на скорость генерирования радикала в системах «КПАВ-гидропероксид», являются противоион КПАВ, реакционная среда, природа гидропероксида.

В ходе исследований получена количественная информация о коллоидных характеристиках катионных ПАВ и гидропероксидов и кинетических характеристиках генерирования радикалов системами ГПК-КПАВ и H2O2-КПАВ в водных и органических средах.

В отличие от КПАВ, анионные и неиогенные ПАВ не инициируют радикальный распад гидропероксидов. Эффект анионных ПАВ зависит от природы гидропероксида и ПАВ.

[4] Кондратьев Ю.И., Соколова О.А. Влияние добавки ПАВ на физико-химические свойства растворов для выщелачивания полиметаллических руд. – Инновации в науке и практике: сборник статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции. В 3-х частях. – 2019. – С. 197–202.

[5] Radioactive waste management in Western Europe: a Review, XXIst Unipede International Congress. Sorento, May 29–June 3. 1988.

В целом, коррекционная обработка пероксидом водорода во многих отраслях промышленности зарекомендовала себя как экономически эффективный, технологически несложный способ очистки водных сред от ПАВ различных видов.

В связи с вышеизложенным, АО «Концерн Росэнергоатом» было поручено филиалу «Нововоронежская АЭС» организовать разработку дополнительных обоснований безопасности с привлечением специализированных научных организаций.

Работы по данной тематике выполнялись ООО «Атом-Инфо» с привлечением исследовательских лабораторий и отдельных специалистов ВГУИТ, ВГУ, МГУ. Работы выполнялись в соответствии с Программой выполнения исследовательских работ по обоснованию разрушения органических комплексообразующих веществ в виде дезактивирующих средств и моющих растворов, утвержденной техническим руководством Заказчика. Программой предусмотрено проведение исследований как на реальных пробах дебалансных вод 1-2 блоков НВАЭС-2, так и на модельных растворах, имитирующих дебалансные воды с различной концентрацией ПАВ.

При проведении измерений использовалось оборудование аттестованных лабораторий субподрядных организаций (ФГБОУ ВО «ВГУ», МГУ им. Ломоносова и др.).

Проведение пробоотбора технологических сред из систем 1-2 энергоблоков НВАЭС-2 осуществлялось персоналом ЦОРО Нововоронежской АЭС совместно с персоналом ООО «АтомИнфо».

Методы исследования содержания ПАВ в водных пробах

На сегодняшний день основными методами анализа ПАВ являются двухфазное и потенциометрическое титрование, гравиметрия и спектрофотометрия. Применение этих методов объясняется их простотой, дешевизной и возможностью в ряде случаев определить класс ПАВ. Однако эти методы имеют недостатки: неселективность по отношению к отдельным представителям ПАВ, неточность определения в связи с присутствием различных мешающих веществ, отсутствие возможности оценить гомологическое распределение в сырье ПАВ. Таким образом, при помощи этих методов невозможно провести индивидуальную идентификацию ПАВ в сырье и готовой продукции. Для разделения и идентификации каждого отдельного компонента в смеси ПАВ и в пробе предпочтительными являются хроматографические методы – газовая хроматографии (ГХ) или высокоэффективная жидкостная хроматография (далее – ВЭЖХ) в сочетании с различными типами детектирования [7]. Тем самым хроматография позволяет определять различные АПАВ (в том числе гомологи и изомеры, а также продукты биодеградации) в разнообразных объектах: моющих средствах, природных и сточных водах, почвах, пыли и др. Для хроматографических разделений ПАВ и продуктов их распада часто используют обращенно-фазовые колонки RP-18 [8,9] и RP-8 [10,11].

В работе показана высокая чувствительность, селективность и эффективность разделения компонентов ПАВ методом ОФ ВЭЖХ с применением трехкомпонентных подвижных фаз состава ацетонитрил/метанол/вода [12].

Одним из самых чувствительных методов анализа органических соединений является жидкостная хроматография в тандеме с масс-спектрометром. Данный метод позволяет определять органические соединения на уровне нг и пг [8,13–15].

Авторами [16] показано, что ультра высокоэффективная жидкостная хроматография в тандеме с масс-спектрометрией высокого разрешения позволяет помимо ионогенных ПАВ определять и неионогенные поверхностно-активные вещества с высокой чувствительностью.

Исходя из вышеизложенного видно, что для определения присутствия ПАВ в различных матрицах существует множество физико-химических методов. Многие методы имеют свои недостатки, однако самым чувствительным методом, позволяющим при этом охарактеризовать тип и структуру анализируемых поверхностно-активных веществ является обращенно-фазовая высокоэффективная жидкостная хроматография в тандеме с масс-спектрометрией.

Идентификация контаминатора

Для разработки методов и научных подходов для проведения данных исследовательских работ были проведены предварительные исследования.

В исходном ТМС, используемом при стирке спецодежды на спецпрачечной НВАЭС-2, подтверждено наличие следующих соединений:

– триполифосфата натрия (гравиметрическим методом, при помощи осаждения),

– сульфонола (методом ВЭЖХ с масс-спектрометрией) (рис. 1–3).

Исходя из масс-спектров, органическим ПАВ приписаны структуры, аналогичные показанным на представленных рисунках (1–3). Таким образом, согласно полученным данным, исходные соединения, вероятнее всего, находятся в форме натриевых солей.

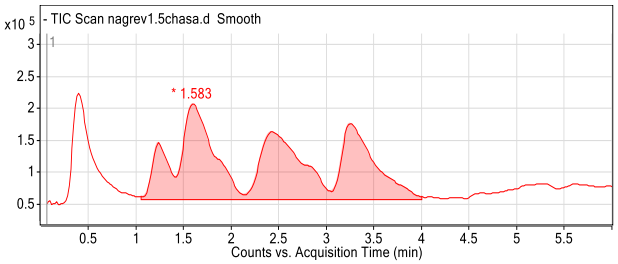


Рисунок 1. *Хроматограмма ТМС*
Figure 1. *Chromatogram of TMS*

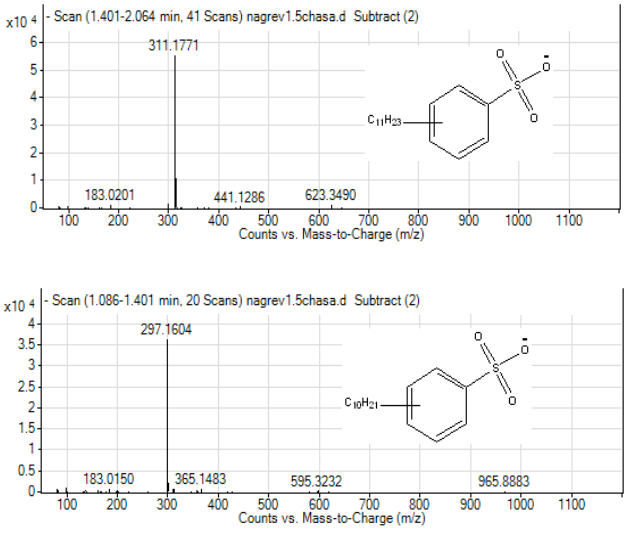


Рисунок 2. *Масс-спектры анионов сульфонола с заместителями С10-С13 в ароматическом ядре (часть 1)*
Figure 2. *Mass spectra of sulfonol anions with C10-C13 substituents in the aromatic core (Part 1)*

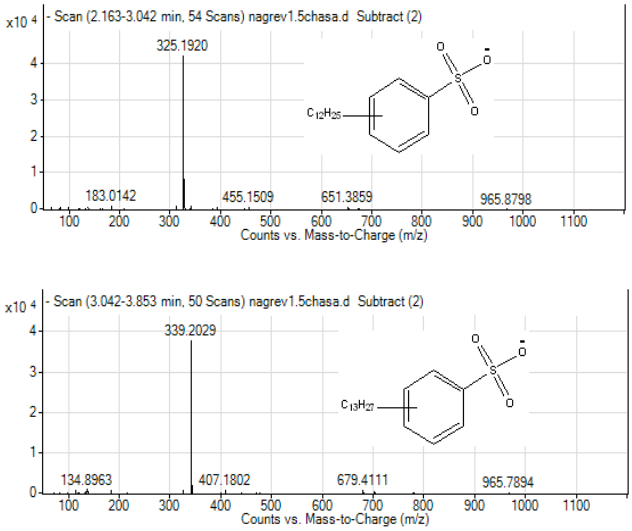


Рисунок 3. *Масс-спектры анионов сульфонола с заместителями С10-С13 в ароматическом ядре (часть 2)*
Figure 3. *Mass spectra of sulfonol anions with C10-C13 substituents in the aromatic core (Part 2)*

Методика измерений

Исследование содержания ПАВ в модельных образцах осуществляется посредством применения метода ВЭЖХ в тандеме с масс-спектрометрией (далее – ВЭЖХ-МС).

Как показано ранее ВЭЖХ-МС является универсальным методом разделения и детектирования соединений практически всех классов органических соединений. С помощью данного метода решаются задачи качественного и количественного состава различных смесей органического происхождения.

Используемое при лабораторных исследованиях оборудование:

– жидкостный хроматограф Agilent 1260 Infinity в тандеме с времяпролетным масс-спектрометром Agilent 6230 TOF LC/MS;

– масс-спектрометр Agilent 6230 TOF LC/MS с типом ионизации электроспрей.

Условия хромато-масс-спектрометрического анализа:

– колонка Agilent Zorbax Eclipse Plus Phenyl-Hexyl (2.1 x 50 mm; 1.8 µm);

– объем вводимой пробы 7 мкл;

– скорость потока 0,4 мл/мин.;

– температура термостата колонок 35,0 ^{0}C;

– элюирование градиентное (табл. 1);

– время анализа 7 минут, далее промывка системы в течение 7 минут подвижной фазой как при старте анализа;

– метод ионизации – двойной электроспрей (dual-ESI);

– сканирование в отрицательной полярности;

– напряжение на капилляре 3,5 кВ, фрагментаторе 191 В, скиммере 66 В, OctRF 750 В;

– газ осушитель азот;

– диапазон сканирования 50–2000 m/z;

– программное обеспечение MassHunter Qualitative Analysis, B.06.00, Agilent Tec.

Таблица 1. *Параметры элюирования*
Table 1. *Elution parameters*

Время, мин	Вода (0,1 % муравьиной кислоты), %	Ацетонитрил (0,1 % муравьиной кислоты), %	Поток, мл/мин
0,0	55,0	45,0	0,4
1,0	40,0	60,0	0,4
3,0	0,0	100,0	0,4
7,0	0,0	100,0	0,4

Работы, связанные с построением и исследованием лабораторных модельных растворов жидких сред проводились на химическом факультете Воронежского государственного университета.

Работа с пробами жидких технологических сред проводилась по аттестованной Методике измерений массовой концентрации анионных ПАВ в питьевых, поверхностных и сточных водах экстракционно-фотометрическим методом. Методика утверждена федеральным бюджетным учреждением «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия».

Применяемые средства измерений, оборудование и материалы:

– фотоэлектроколориметр или спектрофотометр любого типа, позволяющий измерять оптическую плотность при X = 650 нм;

– весы лабораторные специального класса точности с ценой деления не более 0,1 мг, наибольшим пределом взвешивания не более 210 г по ГОСТ Р 53228-2008;

– пипетки 1-2-2-5; 1-2-2-10 по ГОСТ 29227-91;

– колбы 2-50-2; 2-100-2 по ГОСТ 1770-74;

– цилиндры 1-25 по ГОСТ 1770-74;

– кюветы с толщиной оптического слоя 30 мм;

– воронки В-25-38 ХС по ГОСТ 25336-82;

– воронки делительные ВД-1-250 ХС по ГОСТ 25336-82;

– пробирки ПЗ-25 ХС по ГОСТ 25336-82;

– стаканы Н-1 - 1000 ТХС; Н-2 - 2000 ТХС по ГОСТ 25336-82.

Массовую концентрацию АПАВ, X (мг/дм3) в пробах рассчитывают по формуле (1):

$$X = (a \times 100) / V, \quad (1)$$

где a – массовая концентрация анионных поверхностно-активных веществ, найденная по градуировочному графику, мг/дм^3;

100 – объем, до которого доводится проба, см^3;

V – объем пробы, взятый для анализа, см^3.

Результат измерений по вышеуказанной методики в документах, предусматривающих его использование, может быть представлен в виде выражения (2):

$$X \pm 0{,}01 \times U \times X, \text{ (мг/дм}^3\text{)}, \quad (2)$$

где X – результат измерений массовой концентрации, установленный по п.10, мг/дм^3;

U – значение показателя точности измерений.

Исследования технологических сред проводили в Аналитическом центре МГУ им. М.В. Ломоносова.

Пробоподготовку проб жидких сред проводили в Лаборатории комплексных исследований Воронежского государственного университета.

Отбор проб технологических сред

С целью подтверждения результатов, полученных при исследовании модельных растворов, программой исследований было предусмотрено проведение пробоотбора и исследований характеристик реальных технологических сред (дебалансных вод) из оборудования энергоблоков НВАЭС-2.

Отбор проб производился в маркированные пластиковые емкости объемом 10 л. Каждая емкость имела маркировку, позволяющую ее однозначно идентифицировать. После завершения пробоотбора емкость

плотно закрывается штатной крышкой с целью исключения расплескивания при дальнейшей транспортировке.

При отборе проб оформлялись паспорта проб, в которых указывались:

– идентификационная маркировка емкости;

– объем пробы;

– дата пробоотбора;

– место пробоотбора, оборудование, система;

– ФИО, подпись лица, отобравшего пробу.

Из каждой системы было отобрано 3 пробы объемом 10 л каждая. Пробоотбор осуществляется персоналом ЦОРО НВАЭС под контролем представителя Исполнителя (ООО «АтомИнфо»). По согласованию с Заказчиком были установлены следующие точки пробоотбора:

– бак 10KPK30BB002-10UKC14R034. Проба отбиралась сверху через открытый люк;

– бак 10KPF13BB002-10UKC10R041. Проба отбиралась путем открытия арматуры 10KUE10AA140, 113;

– бак 20KPK20BB002-20UKC04R043. Проба отбиралась сверху через открытый люк.

– бак 10KPF13BB003-10UKC10R040. Проба отбиралась путем открытия арматуры 20KUE10AA141,113;

– 00SRP60 (вода спецпрачечной) – 3 пробы по 10 л. Пробы отбирались в пом. 00UKS10R071 из бака 00SRP60BB002 путем открытия арматуры 00KUB20AA102;

– 00SRP70 (вода дезактивации оборудования из здания 00UKU) – 2 пробы по 10 л. Дополнительно была отобрана одна проба объемом 1 л для радиационного контроля перед отправкой за пределы НВАЭС. Пробы отбирались в пом. 00UKS21R036 из бака 00SRP70BB001 – путем открытия арматуры 00KUB20AA106, 00KUB20AA114;

– 00SRP70 (трапная вода из здания 00UKS) – 2 пробы по 10 л. Дополнительно была отобрана одна проба объемом 1 л для радиационного контроля перед отправкой за пределы НВАЭС. Пробы отбирались в пом. 00UKS21R036из бака 00SRP70BB002 путем открытия арматуры 00KUB20AA106, 00KUB20AA114;

– 00SRP70 (с выпарного аппарата) – 2 пробы по 10 л. Дополнительно была отобрана одна проба объемом 1 л для радиационного контроля перед отправкой за пределы НВАЭС. Пробы отбирались в пом. 00UKS21R036, ВА 00SRP70AT001 путем открытия арматуры 00KUB20AA107, 0KUB20AA108.

При выполнении пробоотбора было обеспечено соблюдение требований радиационной безопасности, установленных «Инструкцией по радиационной безопасности при эксплуатации НВАЭС», включая применение СИЗ, нарядо-допускной системы, меры по нераспространению радиоактивных загрязнений и т.д., а также требований охраны труда, действующих в атомной энергетике [10].

После пробоотбора персоналом ЛРК ОРБ НВАЭС были проведены измерения удельной активности гамма-излучающих радионуклидов и трития в каждой из отобранных проб. При проведении анализа радионуклидов в пробах исследуемых сред использовалось следующее измерительное оборудование:

– комплекс гамма-спектрометрический программно-аппаратный Эко ПАК-02-3;

– радиометр альфа- и бета-излучения спектрометрический «TRI-CARB 4910» (жидкостный сцинтилляционный спектрометр).

Результаты измерений были оформлены протоколами и актом, в котором были определены меры безопасности и порядок отправки проб для дальнейших исследований за территорией промплощадки НВАЭС.

Исследование модельных растворов

С целью определения аналитических зависимостей разрушения органических комплексообразующих веществ в виде дезактивирующих средств и моющих растворов под действием, как только температуры, так и температуры совместно с химическими веществами, а также для разработки методов и научных подходов для проведения данных исследовательских работ эксперименты вы-

полнялись со специально приготовленными модельными растворами жидких сред с различными концентрациями ПАВ.

Для построения модельных растворов жидких сред, необходимых для экспериментов, использовалось техническое моющее средство порошкообразное специального назначения (ТМС) PAOLSRM-П, RM-П1 (ТУ 2381-001-28979913-2018).

При проведении экспериментов по деструкции органических комплексообразующих веществ под действием высоких температур применялся пеногаситель полисилоксанового типа Пента-474 (ТУ 2229-094-40245042-2004), который дозировался в исследуемую пробу с целью снижения активного пенообразования, которое наблюдается при нагреве 60 °С и выше, что препятствует поддержанию постоянной температуры реакционной массы и может приводить к ингибированию окисления.

2,5 г твердого моющего средства взвешивают, результат взвешивания в граммах записывают до четвертого десятичного знака, переносят в мерную колбу вместимостью 250 см^3, растворяют в воде, доводят объем раствора водой до метки и перемешивают (раствор 1). Фильтруют через сухой бумажный фильтр («синяя лента») в сухую колбу, отбрасывая первые порции фильтрата. 50 см^3 полученного фильтрата пипеткой переносят в стакан вместимостью 250 см^3 и добавляют раствор с HCl = 0,5 моль/дм^3 до pH 3,6 (проверяют на pH-метре), перемешивая на магнитной мешалке. Добавляют 10 см^3 буферного раствора и приливают по каплям 12 см^3 раствора триэтилендиаминкобальта.

Все эксперименты по нагреву и дозированию реагентов проводились в стеклянных колбах, снабженных обратным холодильником, при энергичном перемешивании магнитной мешалкой (500 оборотов/мин).

В процессе нагрева выше 60 °С для снижения обильного пенообразования добавляли разбавленный в 10 раз кремнийорганический пеногаситель Пента-474 (ТУ 229-094-40245045-2004).

В экспериментах 1–3 использовались высококонцентрированные растворы ПАВ с целью проверки чувствительности методов анализа (концентрация ТМС – 45 г/л). В экспериментах 4–12 использовались растворы ПАВ с максимальной концентрацией, определенной проектной документацией спецпрачечной НВАЭС-2 (2 г/л).

Общие сведения о подготовленных и использованных модельных растворах, последовательности воздействия на модельные растворы комбинированным воздействием пероксида, температуры, гидроксида натрия (катализатор), перманганата калия (дополнительный контаминатор трапных вод) приведены в таблице 2.

Таблица 2. *Параметры модельных растворов*
Table 2. *Parameters of model solutions*

№ эксперимента	Условия эксперимента				
Концентрация ТМС – 4,5 гр / 100 мл					
Без добавления Перекиси водорода					
Температура, Град		Время обработки, мин			
		90	120	240	420
1	Т = 100 С				
Добавлен Пероксид водорода 15 мл / 100 мл					
2	Т комн				
3	Т = 60 С				
Концентрация ТМС – 2 гр/1 л					
Добавлен Пероксид водорода 40 л на 2 м^3(2 мл / 100 мл)					
Температура, Град		Время обработки, мин			
		45	90	240	420
4	Т комн				
5	Т = 60 С				

№ эксперимента	Условия эксперимента				
6	T = 80 C				
7	T = 100 C				
Добавлено: - Пероксид водорода 40 л на 2 м^3(2 мл / 100 мл) - Каталитическое количество 10% NaOH					
8	T = 60 C				
9	T = 80 C				
Концентрация ТМС – 2 гр / 1 л					
Добавлен Перманганат калия ($KMnO_4$) 5 гр / 1 л р-ра					
Температура, Град		Время обработки, мин			
		45	90	240	360
10	T комн				
11	T = 60 C				
12	T = 100 C				

Основные результаты исследований

Результаты экспериментов подтвердили высокую эффективность выбранного метода исследований для решения поставленной задачи.

В ходе экспериментов модельные растворы и реальные пробы подвергались коррекционной обработке с последующим нагревом. Хроматограммы, полученные для растворов с различным временем термического воздействия, накладывались друг на друга для определения интенсивности разложения ПАВ, находившихся в исходном растворе (рис. 4).

Сводные результаты экспериментов на растворах ПАВ с максимальной проектной концентрацией (2 г/л) показаны на рисунке 5

.

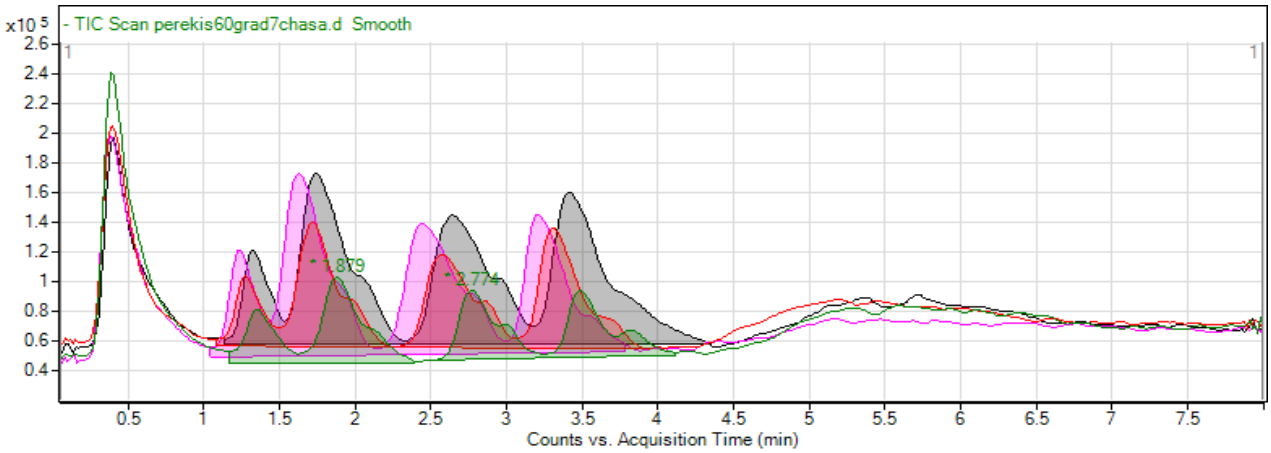


Рисунок 4. *Пример наложенных хроматограмм (эксперимент № 3: ТМС 45 г/л, перекись 150 г/л, T = 60 град.)*

Figure 4. *Example of superimposed chromatograms (experiment No. 3: TMS 45 g/l, peroxide 150 g/l, T = 60 deg.)*

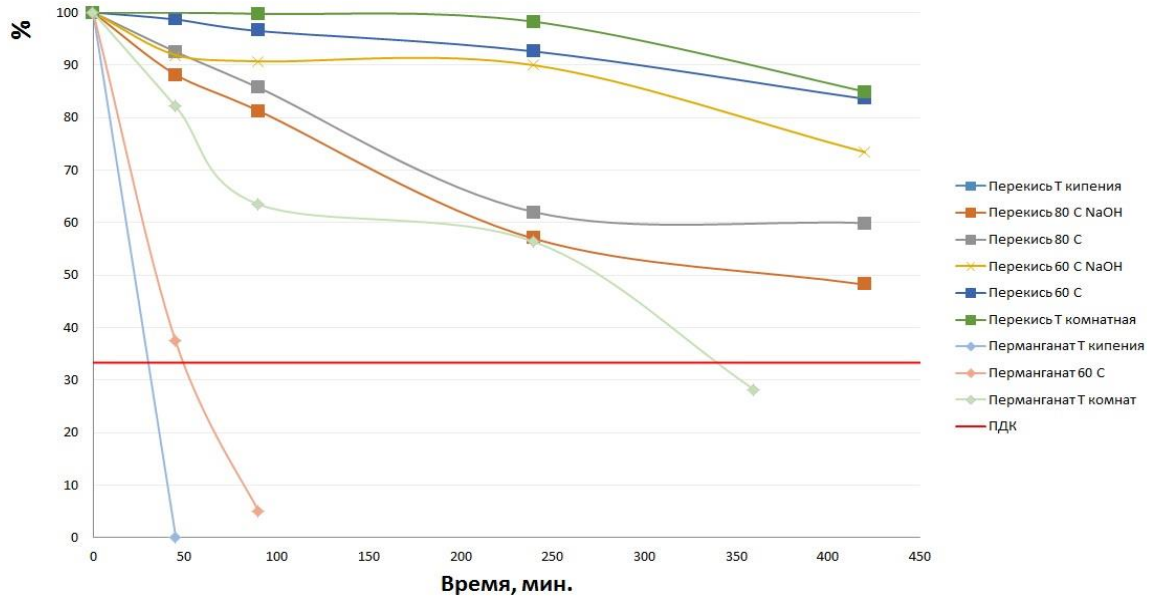


Рисунок 5. *Сводные результаты экспериментов на растворах ПАВ с максимальной проектной концентрацией (2 г/л)*

Figure 5. *Summary results of experiments on surfactant solutions with the maximum design concentration (2 g/l)*

На основании экспериментальных данных, были выполнены расчетные обоснования характеристик работы очистного оборудования НВАЭС-2, обеспечивающего соответствие получаемых РАО требованиям нормативных документов, действующих в области использования атомной энергии:

1. Показано, что при применении максимально консервативного подхода, при котором все соли в дебалансных водах являются ПАВ, эффективность очистки от ПАВ должна составлять не менее 81 % при упаривании кубового остатка перед направлением на цементирование до 150 г/л и не менее 95 % – при упаривании до 450 г/л.

При рассмотрении более реалистичного варианта, при котором не более 50 % солесодержания обусловлено присутствием ПАВ – эффективность очистки от ПАВ должна составлять не менее 62 %.

2. Показано, что при дозировании пероксида водорода в водные растворы, характерные для НВАЭС-2, разложение комплексообразующих веществ происходит в процессе переработки в диапазоне температур 80–100 градусов Цельсия. При температурах 80 °С и выше концентрация ПАВ достигает значения 62 %, что соответствует не превышению содержания ПАВ в кубовом остатке значения 1 % (без консервативного подхода), после 4 часов обработки.

Применение максимально консервативного подхода, при котором все соли обусловлены наличием ПАВ, разложение комплексообразующих веществ происходит в диапазоне температур 95–100 °С во временном интервале 45–90 мин. После 90 мин температурного воздействия при 100 °С все комплексообразующие вещества разлагаются полностью.

Эффективность данного метода очистки от ПАВ при небольших исходных концентрациях ПАВ (до 2 г/л) и нагреве раствора менее 80 градусов Цельсия не превышает 50 % от исходной концентрации ПАВ.

Незначительное влияние на интенсификацию процесса оказывает добавление катализатора (10 % NaOH), концентрация ПАВ в 62 % достигается при меньшем времени – 3,5 час, однако, не позволяет достичь расчетного при консервативном подходе минимального коэффициента очистки от ПАВ (81 %) при технологически обоснованных временах выдержки раствора (до 7 часов).

3. Хорошие результаты показало дозирование в исследуемые модельные растворы перманганата калия. Процесс разложения комплексообразующих веществ интенсивно происходит уже при комнатной температуре. Данное вещество может присутствовать в трапных водах и водах спецпрачечной в качестве дополнительного контаминатора.

Дозирование перманганата калия в очищаемую воду позволяет достичь фактически 100 %-ной очистки от ПАВ, не прибегая к нагреву воды до температуры кипения.

Эффективность очистки от ПАВ до уровня содержания комплексообразующих веществ в кубовом остатке в пределах ниже 1 % достигается при дозировании перманганата калия спустя 70 мин после начала эксперимента температурного, а при 100 °С – менее, чем за 40 мин.

4. Таким образом, для обеспечения выполнения требований НП-093-14 при эксплуатации установок 00SRP, 00KPN, 10KPN, 20KPN, можно рекомендовать Нововоронежской АЭС изменение рецептуры коррекционной обработки вод спецпрачечной и трапных вод, собираемых в системах спецканализации, путем дозирования перманганата калия в количествах порядка 5 г/л (при условии отсутствия других технологических ограничений).

5. Полученные значения концентрации комплекообразователей во всех отобранных для данной работы пробах технологических сред показали их низкое содержание на уровне единиц и сотых долей мг/дм^3, либо находится ниже границы предела измерений, что в 50–100 раз меньше пороговых значений, обусловленных требованиями нормативной документации (НП-093-14) – содержание комплексообразующих веществ в кубовом остатке в пределах ниже 1 %.

В целом общее содержание ПАВ в жидких отходах НВАЭС находится примерно на одном уровне по всем пробам и составляет величины на грани нижнего предела измерения по методике, что подтверждает правильность выбранного направления исследований с применением лабораторных модельных растворов.

6. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании безопасности технологий обращения с РАО, применяемых в атомной энергетике. Предварительные результаты исследования опубликованы[5] и оформлены отчетом[6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Хазиева Э.Б., Набойченко С.С., Свиридов. Исследование возможности применения комбинированных ПАВ при автоклавном выщелачивании сульфидных цинковых концентратов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016;20(9):147–155. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-147-155

Khazieva E.B., Naboychenko S.S., Sviridov V.V. Investigation of combined surfactant application possibility under zinc sulfide concentrate pressure leaching. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):147–155. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-147-155

2. Колмачихина Э.Б., Рыжкова Е.А., Дмитриева Д.В., Вакула К.А., Мокрецов М.А. Исследование влияния лигносульфоната, анионных поверхностно-активных веществ и их смесей на показатели автоклавного выщелачивания цинкового концентрата. *Вестник Иркутского государственного технического университа*. 2018;22(8):143–150. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-8-143-150

Kolmachikhina E.B., Ryzhkova E.A., Dmitrieva D.V., Vakula K.A., Mokretsov M.A. Study of lignosulfonate, anionic surfactants and their mixture effect on zinc concentrate pressure leaching. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(8):143–150. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-8-143-150

3. Jungling T. Nuclear Regulatory Commission. Regulations and Experience with Solidification. Stabilization Technology. T. Jungling, J. Greeves. *American Society for testing and materials*. Philadelphia. 1989. P. 77-82. https://www.astm.org/stp22871s.html

4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Москва: Стройиздат, 1990. 394 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01001526240 (дата обращения: 01.09.2024).

---

[5] Гордеева Е.Л., Харин А.Н., Потапов М.А., Шихалиев Х.С. Разложение действующих веществ твердого моющего средства под действием пергидроля. – Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения И.В. Курчатова, Нововоронеж, 06-08.12.2023 г. – Нововоронеж: РПГ «Девятое облако», 2023. – С. 239-242.

[6] Отчет о проделанной работе по обоснованию разрушения органических комплексообразующих веществ в виде дезактивирующих средств и моющих растворов, и оценке соответствия кондиционированных ЖРО критериям приемлемости для захоронения по критерию «Содержание комплексообразующих веществ». – ООО «Атом-Инфо», 2023.

5. Гафарова В.В., Кулагина Т.А. Безопасные методы утилизации радиоактивных отходов. *Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: техника и технологии.* 2016;9(4):585–597. https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-4-585-597

Gafarova V.V., Kulagina T.A. Safe methods of radioactive waste utilization. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* 2016;9(4):585–597. https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-4-585-597

6. Трунова Н.А. Влияние природы поверхностно-активных веществ на распад гидропероксидов в коллоидных системах. Автореферат диссертации на соискание степени кандидата химических наук. Москва, 2009. 22 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01003463764?ysclid=m472l587j1240988353

Trunova N.A. Influence of the nature of surfactants on the decomposition of hydroperoxides in colloidal systems. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Chemical Sciences. Moscow, 2009. 22 p. https://search.rsl.ru/ru/record/01003463764?ysclid=m472l587j1240988353

7. Мубаракова Л.Р., Будников Г.К. Хроматографические методы в анализе продуктов бытовой химии и косметических средств на содержание ПАВ. Заводская лаборатория. *Диагностика материалов*. 2018;84(5):5–13. https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-5-5-13

Mubarakova L.R., Budnikov G.K. Chromatographic methods in analysis of household chemicals and cosmetics for the presence of surface active substances. Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2018;84(5):5–13. (In Russ.) https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-5-5-13

8. Lara-Martín P.A., Gómez-Parra A., González-Mazo E. Development of a method for the simultaneous analysis of anionic and non-ionic surfactants and their carboxylated metabolites in environmental samples by mixed-mode liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A.* 2006;1137(2):188–197. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.10.009

9. Bassarab P., Williams D., Dean J.R., Perry J.J. Determination of quaternary ammonium compounds in seawater samples by solid-phase extraction and liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A.* 2011;1218(5):673–677. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.11.088

10. León V.M., González-Mazo E., Gómez-Parra A. Handling of marine and estuarine samples for the determination of linear alkylbenzene sulfonates and sulfophenylcarboxylic acids. *Journal of Chromatography A.* 2000;889(1–2):211–219. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00569-0

11. Merino F., Rubio S., Pérez-Bendito D. Evaluation and optimization of an on-line admicelle-based extraction-liquid chromatography approach for the analysis of ionic organic compounds. *Analytical Chemistry.* 2004;76(14):3878–3886. https://doi.org/10.1021/AC049736V

12. Лобачев А.Л., Колотвин А.А. Идентификация и количественное определение приоритетных анионных поверхностно-активных веществ в моющих средствах методами ТСХ и ВЭЖХ. *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2006;6(1):90–98. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=12051627&ysclid=m472xl12q1836980874 (дата обращения: 01.09.2024).

Lobachev A.L., Kolotvin A.A. Identification and quantitative determination of priority anionic surfactants in detergents by TLC and HPLC methods. *Sorption and chromatographic processes.* 2006;6(1):90–98. (In Russ.). Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=12051627&ysclid=m472xl12q1836980874 (accessed: 01.09.2024).

13. Lara-Martín P.A. Gómez-Parra A., González-Mazo E. Simultaneous extraction and determination of anionic surfactants in waters and sediments. *Journal of Chromatography A.* 2006;1114(2):205–210 https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.03.014

14. Pan N., Pietrzyk D.J. Separation of anionic surfactants on anion exchangers. *Journal of Chromatography A.* 1995;706(1–2):327–337. (In Russ.). Available at: https://archive.org/details/sim_journal-of-chromatography-a_1995_706_index_0 (accessed: 01.09.2024).

15. Murakami M., Takada H. Perfluorinated surfactants (PFSs) in size-fractionated street dust in Tokyo. *Chemsphere.* 2008;73(8):1172–1177. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.07.063

16. Амелин В.Г. Большаков Д.С. Идентификация и определение неионогенных поверхностно-активных веществ методом ультра высокоэффективной жидкостной хроматографии-масс-спектрометрии высокого разрешения. *Журнал органической химии*. 2021;76(2):166–182. https://doi.org/10.31857/S0044450220120026

Amelin V.G., Bol'shakov D.S. Identification and determination of nonionic surfactants by ultrahigh-performance liquid chromatography-high-resolution. *Journal of analytical chemistry.* 2021;76(2):226–242. https://doi.org/10.31857/S0044450220120026

ВКЛАД АВТОРОВ:

Поваров В.П. – проведение исследований процессов разложения (ПАВ) в дебалансных водах атомных электростанций посредством коррекционной обработки перекисью водорода с последующим нагревом;

Росновский С.В. – организация исследований; выполнение исследований на модельных растворах, контроль качества и координацию работы команды;

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Povarov V.P. – research on the processes of surfactant decomposition of surfactants in unbalance water of nuclear power plants by means of corrective treatment with hydrogen peroxide and subsequent heating;

Rosnovsky S.V. – organizing research, performing research on model solutions; quality control and coordination of the team's work;

Мельников Э.С. – методическая и организационная поддержка при разработке плана исследований, пробоотборе, анализе полученных результатов;
Литовченко М.Н. – пробоотбор технологических сред, техническая поддержка при проведении исследований;
Росновский В.С. – обработка и систематизация результатов исследований, подготовка материалов к печати;
Гордеева Е.Л. – проведение исследований в дебалансных водах атомных электростанций посредством корреционной обработки перекисью водорода с последующим нагревом;
Харин А.Н. – исследование зависимости эффективности очистки раствора от исходной концентрации ПАВ, времени и температуры, от наличия дополнительного контаминатора (перманганата калия);
Шихалиев Х.С. – методика определения вида и концентрации ПАВ в водных растворах на основе ВЭЖХ-МС; план исследований, методическая поддержка при выполнении работ;

Потапов М.А. – обобщение полученных результатов, построения аналитических зависимостей.

Melnikov E.S. – methodological and organizational support in the development of the research plan, sampling, and analysis of the results obtained;
Litovchenko M.N. – sampling of technological media, technical support for research;
Rosnovsky V.S. – processing and systematization of research results, preparation of materials for printing;
Gordeeva E.L. – research on the processes of surfactant decomposition of surfactants in unbalance water of nuclear power plants by means of corrective treatment with hydrogen peroxide and subsequent heating;
Kharin A.N. – study of dependence of solution cleaning efficiency on initial surfactant concentration, time and temperature, on the presence of an additional contaminant (potassium permanganate);
Shikhaliev H.S. – methodology for determining the type and concentration of surfactants in aqueous solutions based on the method of high-performance liquid chromatography in tandem with mass spectrometry (HPLC-MS), research plan, methodological support in the implementation of work;
Potapov M.A. – summarizing of the obtained research results, construction of analytical dependencies.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Финансирование за счет средств Нововоронежской АЭС.

FUNDING:
Financing from Novovoronezh NPP funds.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:
No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

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

Росновский Сергей Викторович, кандидат технических наук, заместитель главного инженера по радиационной защите Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.
e-mail: RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Мельников Эдуард Сергеевич, начальник цеха по обращению с радиоактивными отходами Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.
e-mail: MelnikovES@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Литовченко Михаил Николаевич, ведущий инженер цеха по обращению с радиоактивными отходами Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.
e-mail: LitovchenkoMN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Росновский Виктор Сергеевич, оператор реакторного цеха Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоро-

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

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

Sergey V. Rosnovsky, Can. Sci. (Engin.), Deputy Chief Engineer for Radiation Protection Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: RosnovskySV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Eduard S. Melnikov, Head of the Radioactive Waste Management Department Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: MelnikovES@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Mikgail N. Litovchenko, Lead engineer of the Radioactive Waste Management Department Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: LitovchenkoMN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Victor S. Rosnovsky, Reactor shop operator Novovoronezh Nuclear Plant the branch of Rosenergoatom

ронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС), г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.
e-mail: rvs05071999@yandex.ru

Гордеева Елена Львовна, Генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью «АтомИнфо», г. Нововоронеж, Воронежская обл., Российская Федерация.
e-mail: atominfo@bk.ru

Харин Алексей Николаевич, кандидат физико-математических наук, Начальник Управления инновация и предпринимательства Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0003-3689-2859
e-mail: kharin@vsu.ru

Шихалиев Хидмет Сафарович, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой органической химии Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: shikh@online.ru

Потапов Михаил Андреевич, кандидат химических наук, научный сотрудник кафедры органической химии Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: potapov@vsu.ru

Поступила в редакцию / Received 10.09.2024
После доработки / Revised 11.12.2024
Принята к публикации / Accepted 17.12.2024

Concern JSC (Novovoronezh NPP), Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: rvs05071999@yandex.ru

Elena L. Gordeeva, General Principal of the AtomInfo Limited Liability Company, Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: atominfo@bk.ru

Alexey N. Kharin, Can. Sci (Phys. and Math.), Head of the Department of Innovation and Entrepreneurship of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0003-3689-2859
e-mail: kharin@vsu.ru

Khidmet S. Shikhaliev, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Department of Organic Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation.
e-mail: shikh@online.ru

Mikhail A. Potapov, Can. Sci. (Chem.), Researcher at the Department of Organic Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation.
e-mail: potapov@vsu.ru

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

УДК 623.454.8: 621.86
https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02
EDN GIAKOU
Оригинальная статья / Original paper

Оценка технического состояния малогабаритной ядерной энергетической установки после опрокидывания транспортного агрегата

О.А. Губеладзе ✉, А.Р. Губеладзе
Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Российская Федерация
✉ *buba26021966@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается заключительный этап развития аварийной ситуации связанной с опрокидыванием транспортного агрегата с малогабаритной ядерной энергетической установкой. Проведенное математическое моделирование позволило получить информацию о возможных последствиях. В числе наиболее серьезных прогнозируемых повреждений – нарушения теплозащитного покрытия в области наконечника и донной части блока, входящего в состав разделяющейся головной части. Для оценки неприемлемости того или иного повреждения использована методика расчета аэродинамических характеристик течений вблизи поверхности с дефектом. При незначительных повреждениях возможно рассмотрение вопроса о дальнейшем использовании блока по назначению, что может быть важно в угрожаемый период для государств с ограниченным количеством подобных изделий.

Ключевые слова: малогабаритная ядерная энергетическая установка, опрокидывание транспортного агрегата, разделяющаяся головная часть, прогнозируемые повреждения, теплозащитное покрытие.

Для цитирования: Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Оценка технического состояния малогабаритной ядерной энергетической установки после опрокидывания транспортного агрегата. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):19–26. https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02

For citation: Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Technical condition assessment of a small-sized nuclear power plant after transportation unit overturning. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):19–26. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02

Technical condition assessment of a small-sized nuclear power plant after transportation unit overturning

Oleg A. Gubeladze ✉, Avtandil R. Gubeladze
Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Rostov region, Russian Federation
✉ *buba26021966@yandex.ru*

Abstract. The article considers the final stage of emergency development associated with the transport unit overturning with a small-sized nuclear power plant. Mathematical modelling allowed to obtain information about possible consequences. Among the most serious foreseeable damages are violations of the thermal protection coating in the area of the tip and bottom of the unit, which is a part of the separating head unit. To assess the unacceptability of this or that damage, the method of calculation of aerodynamic characteristics of flows near the surface with a defect was used. In case of insignificant damage, it is possible to consider further use of the unit for its intended purpose, which may be important in the threatened period for states with a limited number of such products.

Keywords: small-size nuclear power plant, overturning of the transportation unit, separating head part, predicted damage, heat shielding.

© Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р., 2024

Малогабаритные ядерные энергетические установки (далее – МЯЭУ) условно можно разделить на две группы: устройства для получения тепловой, электрической или механической энергии в ходе управляемой ядерной реакции, осуществляемой в ядерном реакторе; ядерные боеприпасы – устройства, использующие ядерную энергию, высвобождающуюся в результате лавинообразно протекающей ядерной реакции деления тяжелых ядер или термоядерной реакции синтеза легких ядер. К подвижным объектам с МЯЭУ относятся: транспортные средства с ЯЭУ, ядерные энергетические установки судов, плавучие атомные тепловые электростанции, космические и летательные аппараты с ядерными источниками энергии; мобильные пусковые установки ракет с ядерными боеприпасами и агрегаты для перевозки ядерных боеприпасов; установки для транспортирования ядерного топлива и ядерных материалов, находящихся в транспортно-упаковочных комплектах, сухопутные передвижные атомные электростанции.

Вероятностные модели для различных этапов эксплуатации ракетно-ядерного вооружения будут существенно отличаться друг от друга. При ведении боевых действий обычными средствами поражения на первый план выходят аварийные ситуации (далее – АС), связанные с преднамеренными нерегламентированными деструктивными воздействиями (далее – НДВ). Наиболее опасной операцией является транспортировка головных частей (далее – ГЧ) автомобильным транспортом как в составе носителя на подвижных пусковых установках, так и отдельно на транспортных агрегатах (далее – ТА). При этом возможны различные аварийные ситуации, в том числе пожары, опрокидывания, столкновение с преградой [1].

Значения характеристик внешних воздействующих факторов в моделях аварийных ситуаций определяются с учетом эксплуатации комплекса, а также выполненных исследований безопасности объекта. Из перечня возможных АС и этапов их развития выбраны представленные в таблице 1.

В СССР начале 1991 г. проведен полномасштабный эксперимент по проверке боеспособности боевого железнодорожного ракетного комплекса при воздействии взрывной ударной волны [2,3]. Объектами исследований были две ПУ с загруженным электромакетом ракеты и командный пункт (удаленность взрыва от объекта испытания: 850 и 450 м от центра взрыва соответственно). Взрыв был наземный направленный, заряд обычный (неядерный). Мощность заряда не менее 0,25 кт. Для имитации ядерного взрыва использовали противотанковые мины ТМ-57 [2], которые были выложены в форме усеченной пирамиды высотой 20 м.

Кроме того, проводилась серия экспериментов по моделированию ударных воздействий на подвижную ПУ или ТА при столкновении или опрокидывании:

– опрокидывание ТА с изделием (с макетом заряда без взрывчатых и радиоактивных веществ, делящихся материалов, источников ионизирующего излучения и электродетонаторов);

– изделие (с макетом) в транспортном контейнере испытывалось на механические воздействия при боковом столкновении транспортной машины с железнодорожным составом.

Таблица 1. *Возможные АС и этапы их развития*
Table 1. *Possible emergencies and stages of emergency development*

Условное обозначение	Аварийная ситуация	Параметры
АС-I	Падение на бетон (грунт) при столкновении; опрокидывании агрегата	Диапазон высот падения, характеристики поверхности
№ этапа	Этап	
Э-1	Удар о поверхность, преграду	
Э-3	Механическое воздействие на узлы крепления	
Э-13	Взрыв, сгорание	

Подобные исследования требуют больших материальных и временных затрат, поэтому наиболее оптимальным путем является разработка математических моделей и проведение проверки их адекватности (верификация) в ходе экспериментальных исследований. Причем, на начальном этапе, с целью уточнения исходных данных для планирования и отработки крупномасштабного эксперимента необходимо предвари-

тельно проводить исследования с физическими моделями в лабораторных условиях.

Углы предельного бокового крена по опрокидыванию β_o и по скольжению β_c характеризуют способность ТА устойчиво двигаться вдоль уклонов. Значения этих углов приближенно определяется из выражений: $\beta_o = arctg(B/2H_{цт})$ и $\beta_c = arctg\mu$. Здесь B – колея агрегата, $H_{тц}$ – высота центра тяжести, G – вес агрегата, μ – коэффициент поперечного скольжения колес ТА.

Поперечную устойчивость тягача в вертикальной плоскости оценивают с использованием следующих критериев:

– статический коэффициент крена $К_с$ – отношение угла крена подрессоренной массы к углу поперечного профиля дороги, вызывающему этот крен в статическом положении;

– динамический коэффициент крена – отношение амплитуды угловых поперечных колебаний подрессоренной массы к максимальному углу наклона профиля дороги, образуемого неровностями под правым и левым колесами.

В данном случае были использованы ранее разработанные модели [4,5] для определения ударных ускорений на элементах конструкции МЯЭУ при ее падении на поверхность (рис. 1*а*) [4] и для оценки силы сопротивления преграды (рис. 1*б*) [5]. Расчетная схема, с момента времени, когда движение в области преграды по нормали прекращается и объект начинает падать на бок [6], представлена на рисунке 1*в*. Кроме того, проведена оценка для ТА с многоблочной ГЧ (рис. 2) при движении вдоль уклона. Все эти модели были объединены в пакет программ, который позволяет проводить предварительную оценку результатов развития подобных аварийных ситуаций.

Рассмотрим АС, связанную с опрокидыванием ТА. В качестве тактической обстановки выбран вариант нападения противника на колонну при движении. Для расчетов выбраны: реальный участок местности (полномасштабный эксперимент с опрокидыванием агрегата); боевой порядок диверсионной группы в засаде (рис. 3). На рисунке 4 представлена исходная расчетная схема для случая воздействия ударной волны на ТА при движении вдоль уклона.

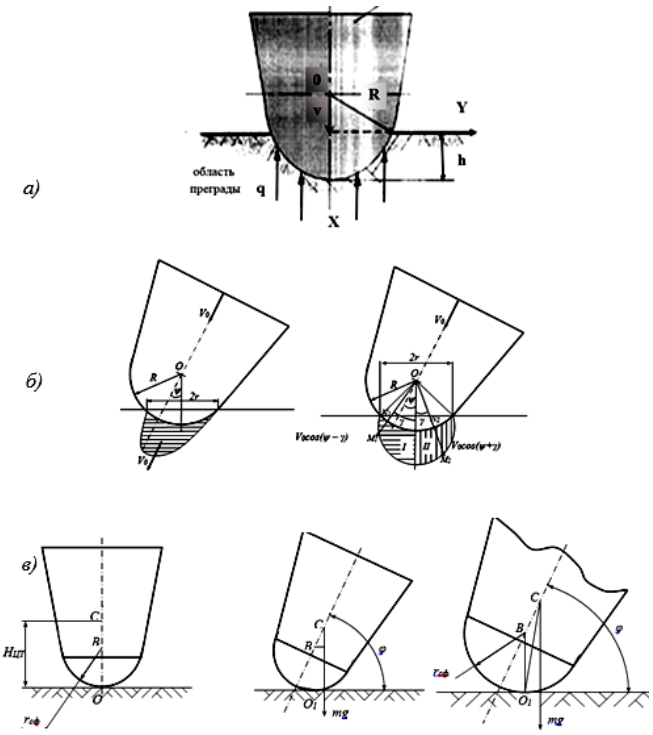


Рисунок 1. *Расчетные модели: а – для определения ударных ускорений на элементах конструкции МЯЭУ при ее падении на поверхность [4]; б – для оценки силы сопротивления преграды [5]; в – при падении на бок [6]*

Figure 1. *Calculation models: a – to determine the shock accelerations on the elements of the MNREU structure when it falls on the surface [4]; b – to estimate the resistance force of the obstacle [5]; c – when falling on the side [6]*

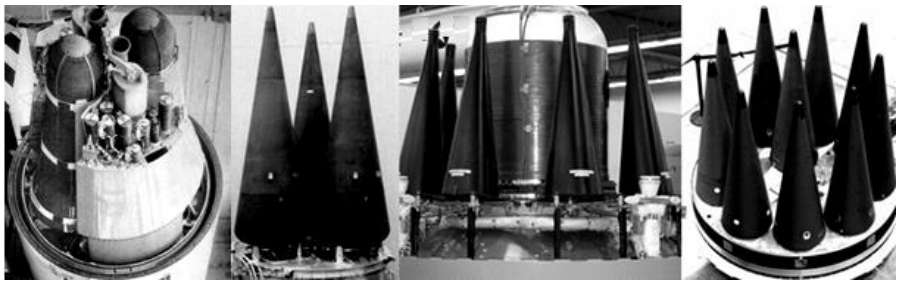


Рисунок 2. *Разделяющиеся головные части ракет стратегического назначения США*
Figure 2. *Separable warheads for U.S. strategic missiles*

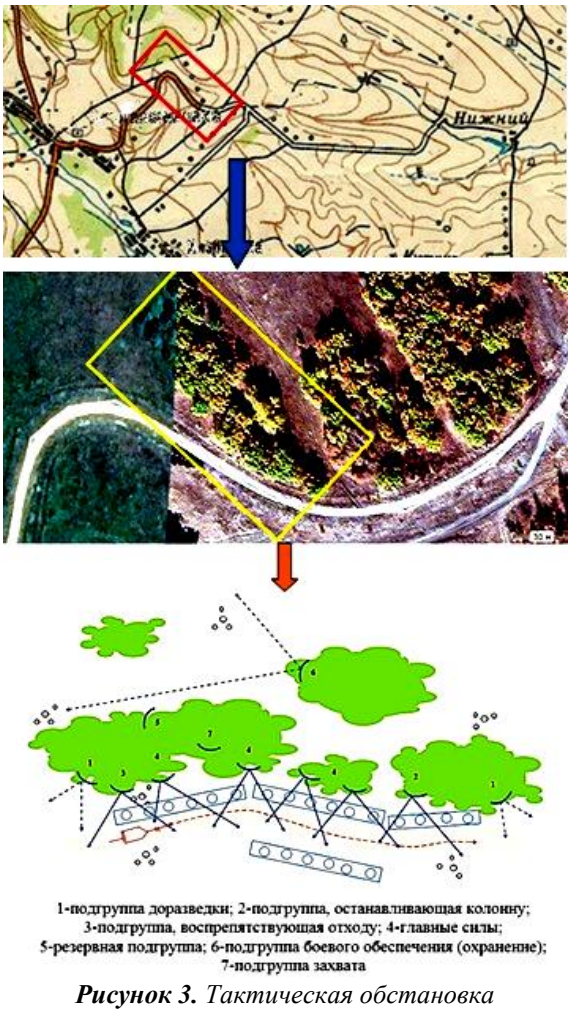


Рисунок 3. *Тактическая обстановка*
Figure 3. *Tactical situation*

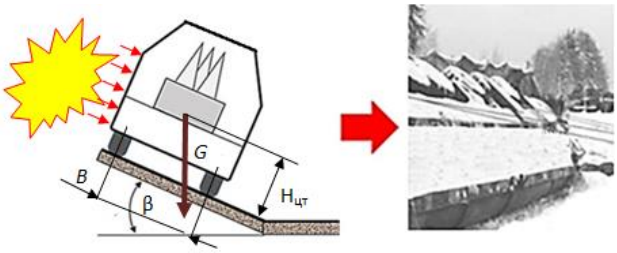


Рисунок 4. *Исходная схема для моделирования*
Figure 4. *Initial scheme to be modeled*

Моделирование проводилось для различных компоновочных схем изделий (по числу блоков – 3, 4, 6, 8, 10). Например, для оснащения с шестью блоками расчет показал, что в результате падения транспортного агрегата будет сорван один блок с посадочного места.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод что, возникновение аварийного взрыва объекта, а также разрушение его конструкции с возможным радиоактивным заражением местности осколками заряда при развитии данной аварийной ситуации маловероятно. В числе наиболее серьезных прогнозируемых повреждений – нарушения теплозащитного покрытия (далее – ТЗП) в области наконечника и донной части блока.

Дефекты (повреждения) обтекаемой поверхности создают сложную картину отрывного и безотрывного течения с образованием скачков уплотнения и волн разряжения. Исследование силового и теплового воздействия на конструкцию объекта при спуске на атмосферном участке траектории связано с изучением устойчивости ламинарного пограничного слоя и его перехода в турбулентное состояние. Переход ламинарного слоя в турбулентный совершается не мгновенно, начало и конец перехода соответствуют первому и второму критическим числам Рейнольдса ($\mathrm{Re}' = 3\times10^6$; $\mathrm{Re}'' = 4\times10^6$) для малых скоростей. При больших скоростях на переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный существенное влияние оказывают сжимаемость газового потока и теплопередача между обтекаемой стенкой и средой. В случае неадиабатической стенки устойчивость зависит от числа Маха набегающего потока M_∞ для заданного соотношения температур T_{cm}/T_∞ (где T_{cm} и T_∞ –

температуры стенки и набегающего потока соответственно). При $T_{ст}/T_{\infty} \geq 2$ с ростом числа Маха до пяти возрастает и предел устойчивости, а при бóльших числах Маха наоборот снижается. Наличие шероховатости поверхности увеличивает тепловые потоки в 1,5-2 раза [7]. Анализ результатов исследований влияния шероховатости на количество унесенного материала ТЗП показал, что неучет этого влияния приводит к заниженным в 1,5-2,5 раза данным по суммарным значениям массы.

В качестве шероховатости может рассматриваться наличие выступов или впадин с высотой (глубиной) *h*. Ожидается, что с ростом относительной шероховатости $h/\delta^*_{кр}$ ($\delta^*_{кр}$ – условная толщина пограничного слоя) характерно снижение значений отношения $\mathrm{Re}^{шер}_{кр}/\mathrm{Re}^{гл}_{кр}$. Пограничный слой у поверхности блока с поврежденным ТЗП будет крайне неустойчивым и его переход в турбулентное состояние произойдет уже на первых секундах полета в плотных слоях атмосферы.

Величина теплового потока *q* будет зависеть от места нахождения дефекта на поверхности (удаление от носка объекта). Также значительные изменения величины удельного теплового потока происходят по всей длине l донной поверхности каверны. Влияние физико-химических превращений на теплоотдачу в пограничном слое возможно учесть, используя метод определяющих параметров. Для композиционных материалов, обладающих сложной структурой, следует обратить внимание на пропорцию между глубиной дефекта и характерным его поперечным размером. То есть, в задаче об изучении разгара в области дефекта (каверны) существенным становится отношение толщины вытеснения δ^* к характерному размеру повреждения *l* и *l/h* (где *h* – глубина каверны).

При обтекании каверны, которая полностью находится в области отрывного течения, если ее продольный размер *l* будет меньше суммы размеров двух отрывных зон за и перед уступами, образующими эту каверну, безразмерный коэффициент теплоотдачи $\overline{\alpha}$ и безразмерный тепловой поток $\overline{q}$ (рис. 5) за точкой отрыва меньше, чем на пластине при тех же условиях обтекания. С приближением к задней стенке каверны вниз по потоку $\overline{\alpha}$ и $\overline{q}$ возрастают и непосредственно перед стенкой достигают максимума. При сложном обтекании каверны, соответствующем течению в замкнутой полости, относительный коэффициент теплоотдачи к нижней стенке значительно выше, чем для случаев обтекания открытой каверны.

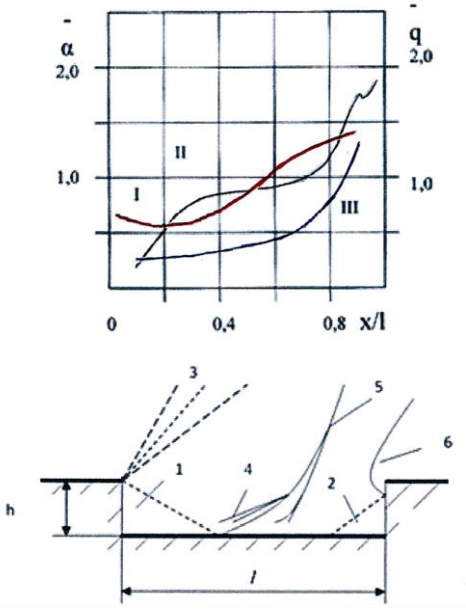


Рисунок 5. *Обтекание закрытой каверны I – $\overline{q}$: M_{∞}=2,9 l/h=5; II – $\overline{\alpha}$: M_{∞}=6,3 l/h=30; III – $\overline{\alpha}$: M_{∞}=6,3 l/h=5; 1,2 -* зоны циркуляционного течения*; 3 – волны разрежения; 4,5,6 – скачки уплотнения*

Figure 5. *Streamline of a closed cavern I– $\overline{q}$: M_{∞}=2,9 l/h=5; II – $\overline{\alpha}$: M_{∞}=6,3 l/h=30; ; III – $\overline{\alpha}$: M_{∞}=6,3 l/h=5; 1,2 – circulation flow zones; 3 – rarefaction waves; 4,5,6 – compaction jumps*

При обтекании обратных уступов (турбулентный отрыв плоского потока) α также повышается в области присоединения потока (рис. 6). При решении задачи определения температурного поля поврежденного ТЗП целесообразно использование ортогональной криволинейной сетки. Здесь решающее значение (для использования метода) имеет перпендикулярность в точке пересечения

касательных к границе и координатной линии, соединяющей узловые точки. В расчетной области, имеющей нерегулярную геометрию (зоны с дефектами поверхности) проводится «блокировка» некоторых объемов регулярной сетки так, чтобы оставшиеся объемы составляли рассматриваемую нерегулярную область, границу которой следует аппроксимировать. Треугольная форма более удобна для аппроксимации нерегулярных областей и получения локального «сгущения» узловых точек сетки метода конечных элементов, который в нашем случае не следует считать отличающимся в принципе от конечно-разностного метода. Возникающие трудности могут быть также успешно преодолены с помощью метода конечных элементов, основанного на интегрировании по контрольному объему.

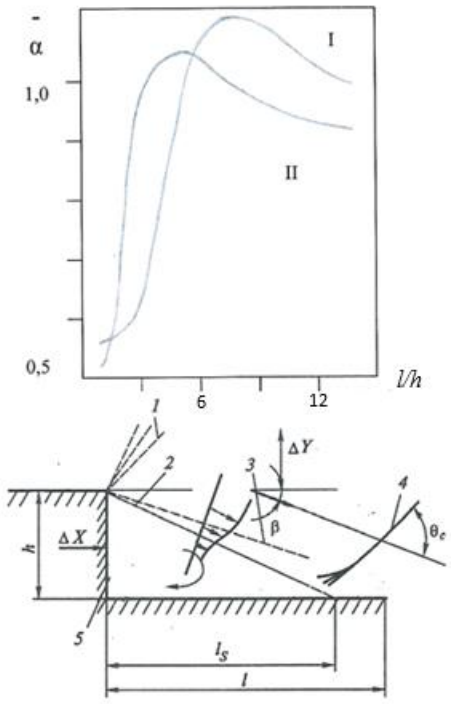


Рисунок 6. *Обтекание открытой каверны I – M_∞=3,5; II – M_∞=2,0; 1 – волны разрежения; 2 – разделяющая линия тока; 3 – «разграничивающая» линия тока; 4 – скачок уплотнения; 5 – область циркуляционного течения*
Figure 6. *Open cavern streamline I – M_∞=3,5; II – M_∞=2,0; 1 – rarefaction waves; 2 – dividing current line; 3 – «delimiting» current line; 4 – compaction jump; 5 – circulating flow region*

Для оценки неприемлемости того или иного повреждения ТЗП использована методика расчета аэродинамических характеристик течений вблизи поврежденной поверхности [8–10]. Некоторые результаты представлены на рисунке 7.

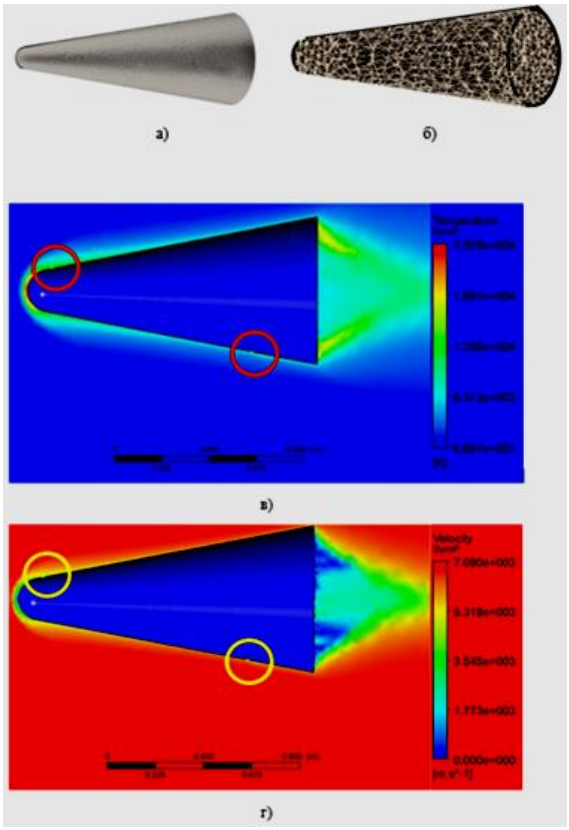


Рисунок 7. *Моделирование аэродинамических характеристик течений вблизи поврежденной поверхности а – исходная модель; б – сетка для применения метода конечных элементов; в – расчет температурных полей; г – расчет скоростей потока*
Figure 7. *Modeling of aerodynamic characteristics of flows near the damaged surface a – initial model; b – mesh for application of finite element method; c – calculation of temperature fields; d – calculation of flow velocities*

Таким образом, при незначительных повреждениях ТЗП оценка технического состояния блока представляется актуальной с точки зрения рассмотрения вопроса о дальнейшем использовании по назначению. Это может быть особенно важно в угрожаемый период для государств с ограниченным количеством подобных изделий.

На рисунке 8 представлены зависимости некоторых параметров от угла наклона траектории к местному горизонту θ для различных скоростей входа в плотные слои атмосферы. Здесь q – тепловой поток к ТЗП,

$\Delta\tau$ – время полета, τ_q /$\Delta\tau$ – относительное время теплового воздействия.

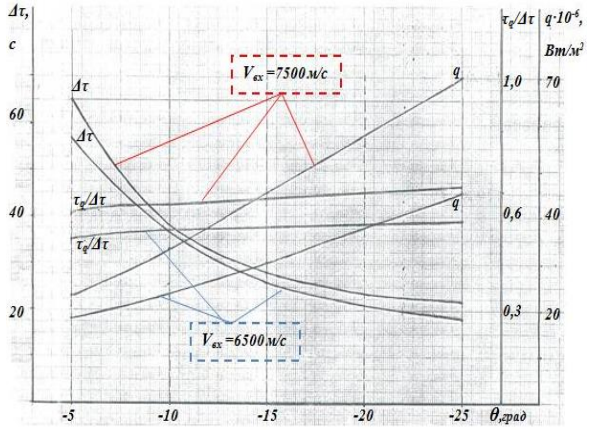


Рисунок 8. *Зависимость теплового потока к теплозащитному покрытию от угла наклона траектории*
Figure 8. *Dependence of heat flux to the heat shield on the trajectory inclination angle*

Проведенные исследования показали:

– пограничный слой у поверхности поврежденного ТЗП будет крайне неустойчивым и его переход в турбулентное состояние произойдет уже на первых секундах полета ББ в плотных слоях атмосферы;

– форма дефекта оказывает слабое влияние, а принципиальное значение имеет лишь соотношение между глубиной и протяженностью донной части (диаметром) дефекта;

– изменяя величину θ, можно снизить тепловую нагрузку на ТЗП с малыми дефектами.

Угол наклона зависит от дальности полета, поэтому следует выбрать соответствующие цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андрюшин И.А. Безопасность ядерного оружия России: законодательная база, научно-технические подходы, организация, жизненный цикл. Министерство РФ по атомной энергии, 1998. 140 с. Режим доступа: https://www.alib.ru/au-andryushin/nm-bezopasnostnmn_yadernogo_oruzhiya_rossii/ (дата обращения: 08.07.2024).

2. Северный космодром России. Том 1. Под общей редакцией Башлакова А.А.. Мирный: Космодром «Плесецк», 2007. 568 с. Режим доступа: https://reallib.org/reader?file=737990&pg=1 (дата обращения: 08.07.2024).

3. Ряжских А.А. Оглянись назад и посмотри вперед. Записки военного инженера. Книга 2. Москва: Герои отечества, 2006. 622 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002910223/ (дата обращения: 08.07.2024).

4. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Определение ударных ускорений на элементах конструкции малогабаритной ядерной энергетической установки при ее падении на поверхность. *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;1(34):7–16. https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-01

Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. The determination of shock accelerations on a small nuclear power plant structural elements when falling to the surface. *Global nuclear safety*. 2020;1(34):7–16. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-01

5. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Определение влияния сопротивления грунтовой преграды на малогабаритную ядерную энергетическую установку при аварийной ситуации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;3(40):25–36. https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-03

Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Determination of soil barrier resistance influence to compact nuclear power plant at emergency situation. *Global nuclear safety*. 2021;(3):25–36. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-03

6. Денисов О.В., Губеладзе О.А., Месхи Б.Ч., Булыгин Ю.И. Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения. Монография. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2016. 278 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008865338/ (дата обращения: 08.07.2024).

7. Губеладзе О.А., Гончаров Р.А., Левченко Е.М., Сахабудинов Р.В. Влияние дефектов поверхности корпуса летательного аппарата на тепловой пограничный слой. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки.* 2008;1:28–29. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9989546 (дата обращения: 12.07.2024).

Gubeladze O.A., Goncharov R.A., Levchenko E.M., Sakhabudinov R.V. Influence of case surface defects of the aircraft on a thermal interface. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Natural Science*. 2008;1:28–29. (in Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9989546 (accessed: 12.07.2024).

8. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р., Бурдаков С.М. Безопасность перспективных космических аппаратов с ядерной энергетической установкой. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;7(1):13–20. Режим доступа: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2017.1.1.2.pdf (дата обращения: 08.07.2024).

Gubeladze O.A., Gubeladze A.R., Burdakov S.M. Safety of perspective spacecrafts with the nuclear power installation. *Global nuclear safety.* 2017;7(1):13–20. (in Russ.). Available at: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2017.1.1.2.pdf (accessed: 08.07.2024).

9. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Калугин В.Т. Аэродинамика отрывных течений. Москва: Высшая школа. 1988. 351 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01001420647 (дата обращения: 12.07.2024).

10. Avery D.E., Kerr P.A., Wieting A.R. Experimental aerodynamic heating to simulated Shuttle tiles. National Aeronautics and Space Administration. Langloy Research Center. Hampton, Virginia, 1983. Available at: https://search.rsl.ru/ru/record/01001420647 (accessed: 12.07.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:
Губеладзе О.А. – написание статьи, математическая реализация решения задачи, участие в проведении эксперимента;
Губеладзе А.Р. – постановка задачи, редактирование текста и участие в проведении эксперимента.
.

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Gubeladze O.A. – writing a paper, mathematical implementation of the problem solution, participation in the experiment;
Gubeladze A.R. – setting the problem, editing the text, and participating in the experiment.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Авторы заявляют об отсутствии финансирования.

FUNDING:
The authors state that there are no sources of funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:
No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Олег Автандилович Губеладзе, кандидат технических наук доцент, Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Российская Федерация.
http://orcid.org/0000-0001-6018-4989
WoS ResearcherID: F-6921-201
e-mail: buba26021966@yandex.ru
Автандил Рубенович Губеладзе, кандидат технических наук доцент, Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0002-6966-6391
WoS ResearcherID: F-7215-2017
e-mail: buba26021966@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Oleg A. Gubeladze, Cand**.** Sci (Eng)**,** Associate Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Rostov region, Russian Federation. Russian Federation.
http://orcid.org/0000-0001-6018-4989
WoS ResearcherID: F-6921-201
e-mail: buba26021966@yandex.ru
Avtandil R. Gubeladze, Cand**.** Sci (Eng)**,** Associate Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Rostov region, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0002-6966-6391
WoS ResearcherID: F-7215-2017
e-mail: buba26021966@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 31.07.2024
После доработки / Revised 05.11.2024
Принята к публикации / Accepted 12.11.2024

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

УДК 539.1.074
https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-03
EDN IUELMH
Оригинальная статья / Original paper

Особенности и способы защиты от техногенного акустического фона, влияющего на характер γ-спектров при проведении измерений КГС

Маджидов А.И., С.Е. Улин, А.П. Елохин ✉, А.Е. Шустов
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация
✉ *elokhin@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается вопрос влияния техногенного акустического фона на формирование γ-спектра, регистрируемого ксеноновым γ-спектрометром (КГС). Показано, что наличие техногенного акустического фона существенно деформирует спектр, производя уширение пика полного поглощения и уменьшения его амплитуды по сравнению со спектром, полученным при отсутствии акустической нагрузки. Такая деформация пика полного поглощения приведет к заведомо заниженным оценкам параметров радиоактивного загрязнения окружающей среды в условиях радиационных аварий, что, в конечном итоге, приведет к неверным решениям при обеспечении радиационной безопасности персонала и населения, располагающегося вблизи объектов использования атомной энергии, на которых и произошла радиационная авария. Наблюдаемая деформация γ-спектра потребовала защитного покрытия γ-спектрометра пористой резиной, используемой для поглощения акустической нагрузки. Результаты, в целом оказались удовлетворительными, но вес γ-спектрометра и его габариты существенно увеличились. В качестве альтернативной защиты авторы предлагают использовать металлическую капсулу с тонкими стенками, помещая в нее детектор и откачивая из нее воздух, т.е. обеспечивая защиту КГС вместо пористой резины, «вакуумной оболочкой», которая образуется при отсутствии упругой среды – воздуха в капсуле. Подобный метод защиты отличается простотой, доступностью и не требует больших финансовых затрат.

Ключевые слова: техногенный акустический фон, γ-спектр, ксеноновый γ-спектрометр, пик полного поглощения, радиоактивное загрязнение окружающей среды, защитное покрытие, «вакуумная оболочка».

Для цитирования: Маджидов А.И., Улин С.Е., Елохин А.П., Шустов А.Е. Особенности и способы защиты от техногенного акустического фона, влияющего на характер γ-спектров при проведении измерений КГС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):27–33. https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-03

For citation: Majidov A.I., Ulin S.E., Elokhin A.P., Shustov A.E. Features and methods of protection from anthropogenic acoustic background, influencing the character of γ-spectra during measurements by xenon γ-spectrometer. *Global nuclear safety.* 2024;14(4):27–33. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-03

Features and methods of protection from anthropogenic acoustic background, influencing the character of γ-spectra during measurements by xenon γ-spectrometer

Azizbek I. Majidov, Sergey E. Ulin , Alexander P. Elokhin ✉, Alexander E. Shustov
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation
✉ *elokhin@yandex.ru*

Abstract. The paper considers the influence of an anthropogenic acoustic background on the formation of the γ-spectrum recorded by a xenon γ-spectrometer. The presence of an anthropogenic acoustic background is shown to deform the spectrum significantly producing a broadening of the total absorption peak and a decrease in its amplitude compared to the spectrum obtained in the absence of acoustic load. Such deformation of the total absorption peak will lead to deliberately underestimated assessments of the parameters of radioactive contamination of the environment in conditions of radiation accidents, which will ultimately lead to wrong decisions in ensuring radiation safety of personnel and population located near nuclear facilities where the radiation accident occurred. The observed deformation of the

© Маджидов А.И., Улин С.Е. Елохин А.П., Шустов А.Е., 2024

γ-spectrum required a protective covering of the γ-spectrometer with porous rubber used to absorb the acoustic load. The results were generally satisfactory, but the weight of the γ-spectrometer and its dimensions increased significantly. As an alternative protection the authors propose to use a metal capsule with thin walls, placing the detector in it and pumping out the air from it, i.e. providing the xenon γ-spectrometer protection instead of porous rubber, «vacuum shell» which is formed in the absence of an elastic medium – air in the capsule. This method of protection is characterised by simplicity, accessibility and does not require large financial outlays.

Keywords: anthropogenic acoustic background, γ-spectrum, xenon γ-spectrometer, total absorption peak, radioactive contamination of the environment, protective coating, «vacuum shell».

При проведении исследований, связанных с радиоактивным загрязнением окружающей среды, оценка спектрального состава γ-излучения, осевшего на подстилающую поверхность, является одной из главных частей работы. Она позволяет определить вид радионуклида и, соответственно, его период полураспада $T_{½}$, а измерение величины активности подстилающей поверхности дает оценку уровня ее радиоактивного загрязнения, в соответствии с которым могут быть приняты решения, определяемые нормативными документами (НРБ-99/2009)[1].

В условиях радиационных аварий, да и в случае случайного радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности [1], целесообразно проводить указанные измерения без непосредственного контакта с радиоактивной средой, что оказывается возможным при использовании радиоуправляемого беспилотного дозиметрического комплекса (далее – БДК) [2, 3], состоящего из ксенонового γ-спектрометра (КГС) высокого давления [4], детектора γ-излучения, видеокамеры, детектора определения высоты полета блоков питания и приемо-передающего информацию устройства [3]. Оператор управления БДК и дозиметрист располагаются в чистой зоне, управляя аппаратом без непосредственного контакта с радиоактивной загрязняющей средой.

Выбор ксенонового γ-спектрометра в качестве основного спектрометрического оборудования определяется его уникальными техническими характеристиками: достаточно высоким разрешением γ-спектра (1,2 % по линии ^{137}Cs), широким температурным диапазоном работы (от –20 °С до +180 °С), не требующим низких температур. Высокая разрешающая способность этого γ-спектрометра обусловлена высоким (до 30 - 40 ат.) давлением газа, т.е. высокой плотностью $\rho^{131}Xe_{54}$ высокой очистки, и достаточно высоким атомным номером (Z = 54), что и обеспечивает высокую ионизационную способность среды.

К недостаткам спектрометра можно отнести достаточно большие габариты и газовую среду, служащую рабочим телом этого γ-спектрометра. Уменьшение габаритов несколько ухудшает энергетическое разрешение, а вот изменение характеристик газовой среды приводит к существенному изменению регистрируемых спектров γ-излучения [5]. Суть этого замечания сводится к тому, что, как показывают эксперименты, энергетическое разрешение ксенонового γ-спектрометра оказывается весьма чувствительным к воздействию внешней акустической нагрузки, действующей одновременно с проведением γ-спектрометрических измерений, т.е. при воздействии на КГС звуковой нагрузки различного уровня [5,6]. Как показано в этих работах синхронное воздействие акустической нагрузки и при измерении гамма спектра радионуклидов приводит к существенному ухудшению спектральных характеристик в зависимости от уровня последней (дБ). В работе [5] приводится теоретическое обоснование этого эффекта, в объеме газа КГС при указанных воздействиях, а в работе [6], кроме того, приведены и результаты измерений (рис. 1,2). На рисунке 1 приводится вид γ-спектра ^{137}Cs при акустической нагрузке, равной 40 дБ (1) и 120 дБ (2), а на рисунке 2 – спектры ^{137}Cs и ^{60}Co при аналогичных нагрузках. Первый пик в области

[1] Нормы радиационной безопасности НРБ –99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523 – 09. – Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/902170553?marker=6560IO

низких энергий соответствует энергии γ-излучения обратного рассеяния ($E_{обр}$ = = 0,184 МэВ), затем идет спад за счет комптоновского рассеяния и, наконец, регистрируется пик полного поглощения, по энергетическому положению которого и идентифицируется этот радионуклид (E_{Cs} = = 0,661 МэВ).

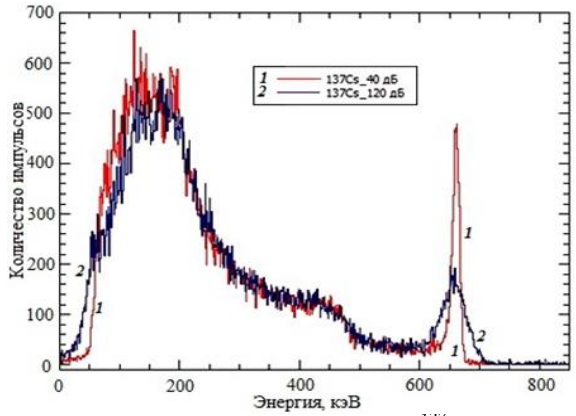


Рисунок 1. *Гамма-спектр источника ^{137}Cs с монитора оператора при естественном шумовом фоне, составляющем 40 дБ (1) и внешней акустической нагрузке в 120 дБ (2) [7]*

Figure 1. *Gamma spectrum of the ^{137}Cs source from the operator's monitor with a natural noise background of 40 dB (1) and an external acoustic load of 120 dB (2) [7]*

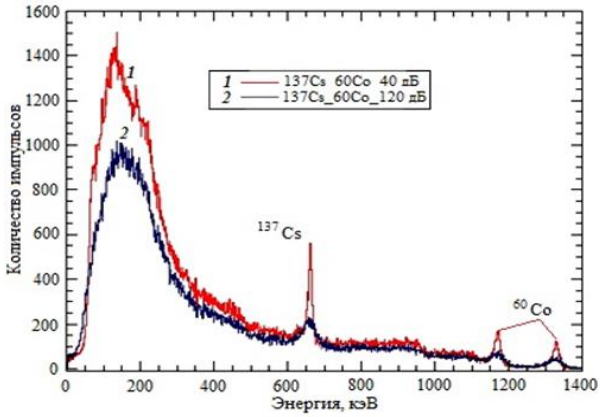


Рисунок 2. *Спектры ^{137}Cs и ^{60}Co при шуме 40 дБ (1) и акустической нагрузке 120 дБ (2) [7]*

Figure 2. *^{137}Cs and ^{60}Co spectra at 40 dB noise (1) and 120 dB acoustic load (2) [7]*

Нетрудно заметить, что воздействие акустики при измерении спектров КГС, приводит к уширению пиков полного поглощения и уменьшения их амплитуды, характерной для условий низкофоновых воздействий акустики, т.е. своеобразной «усадке» спектров. Анализ результатов эксперимента, а также результатов расчета, проведенных в предыдущих работах авторов [5,6], определяющих концентрацию носителей заряда (электронов) в КГС при воздействии акустической нагрузки, свидетельствуют о том, что ее воздействие приводит к перераспределению концентрации носителей заряда в процессе их переноса, что, по-видимому, приводит к росту внутреннего сопротивления газовой среды в результате ее возмущения или за счет вновь возникающего эффекта рекомбинации ионов и электронов, который также может быть обусловлен акустическим возмущением, уменьшая, таким образом, концентрацию носителей заряда, участвующих в их проводимости, т.е. формировании регистрируемого спектра. На это и указывает уменьшение амплитуды пиков полного поглощения (см. рис. 1, 2), их уширение и явное уменьшение низкоэнергетической области комптоновского распределения (см. рис. 2).

На рисунке 3 приведены γ-спектры ^{137}Cs при различной величине акустического шума, которые наглядно демонстрируют указанные особенности воздействия последнего, на формирование γ-спектров, регистрируемых КГС без экранирования его поверхности защитной оболочкой. Источником акустической нагрузки служил генератор шума, усиленный микрофоном.

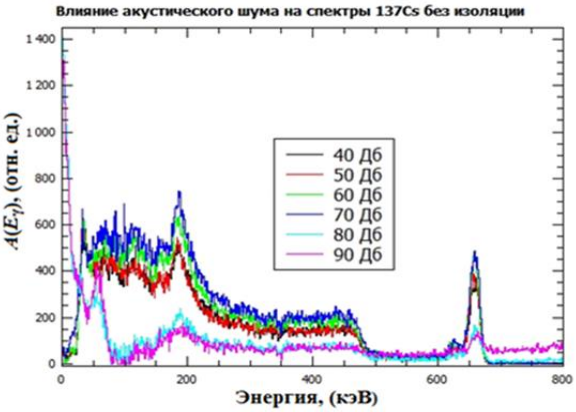


Рисунок 3. *Влияние акустического шума на γ-спектры источника ^{137}Cs при различной акустической нагрузке*

Figure 3. *Influence of acoustic noise on γ-spectra of ^{137}Cs source at different acoustic loading*

В рекомендациях одной из работ авторов [6] было замечено, что от этого нежелательного эффекта можно избавиться путем экранирования поверхности КГС микропористой резиной, используемой для шумопо-

глощения. Действительно, обволакивая цилиндрическую поверхность КГС слоем такой микропористой резины и проводя подобные измерения γ-спектра, удалось получить более детальную картину указанного эффекта.

Результаты эксперимента без защитной оболочки, представленные в виде зависимости «Энергетического разрешения Δ*E*/*E*, %» как функции акустической нагрузки «Шум» в дБ на рисунке 4, а на рисунке 5 приведена зависимость «Δ*E*/*E*, %» как функции акустической нагрузки «Шум» в дБ с защитной оболочкой в виде пористой резины однослойного покрытия (*1*), с покрытием резиной и поролоном (*2*) и просто одним слоем поролона (*3*). Аббревиатура ПШПВ в % означает отношение полуширины пика полного поглощения Δ*E* на полувысоте его пика к измеряемой энергии *E* при различной акустической нагрузке.

Усадка спектра при воздействии акустической нагрузки, как было ранее установлено, приводит к уменьшению амплитуды пика полного поглощения и его уширению, но положение его энергии остается прежним, поэтому с увеличением акустической нагрузки (шума) в единицах дБ отношение Δ*E*/*E* будет расти за счет увеличения Δ*E*, что и демонстрируют графики на рисунках 4 и 5.

Неожиданным оказалась избирательность защитной оболочки из пористой резины на уровни шума в 50 и 80–90 дБ, но общая тенденция влияния акустического воздействия на формирование γ-спектра в подобных условиях, сводится к тому, что с ростом акустической нагрузки спектральное разрешение Δ*E*/*E* увеличивается с ростом шума дБ (рис. 5). Возможно эти особенности связаны с размером микропор в резине, сформировавшихся в результате технологического процесса ее изготовления, тогда этот вопрос можно решить путем увеличения толщины защитной оболочки или путем комбинации материалов защиты, хорошо работающих в определенных диапазонах уровней акустической нагрузки (дБ).

Результаты измерений γ-спектра с увеличением толщины акустической защиты приведены на рисунке 6.

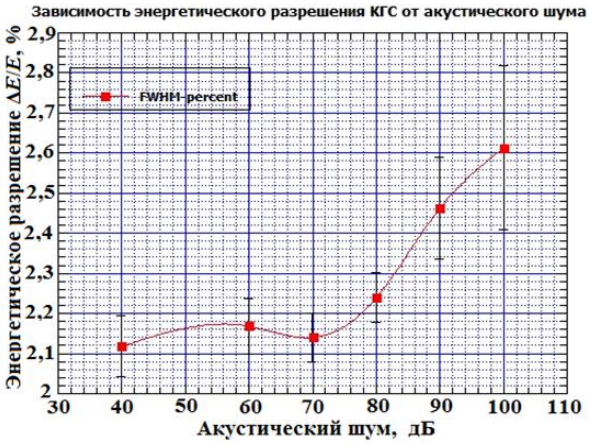


Рисунок 4. *Энергетическое разрешение ΔE/E регистрируемого спектра ^{137}Cs в зависимости от акустического шума (без защитной оболочки)*
Figure 4. *Energy resolution ΔE/E of the recorded ^{137}Cs spectrum as a function of acoustic noise (without shielding)*

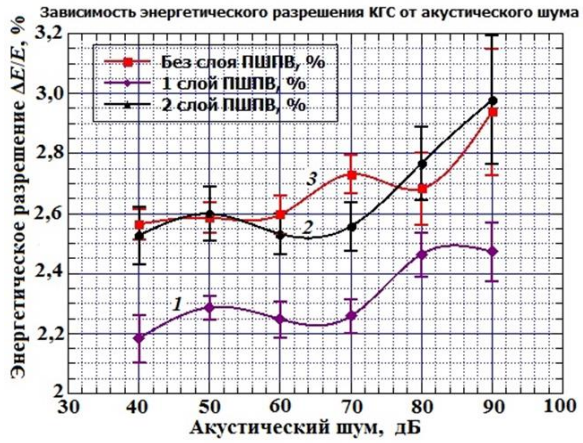


Рисунок 5. *Энергетическое разрешение ΔE/E регистрируемого спектра ^{137}Cs в зависимости от акустического нагрузки с (защитной оболочкой) в виде пористой резины однослойного покрытия (1), с покрытием резиной и поролоном (2) и просто одним слоем поролона (3)*
Figure 5. *Energy resolution ΔE/E of the recorded ^{137}Cs spectrum as a function of acoustic loading with (protective shell) in the form of porous rubber single-layer coating (1), with rubber and foam coating (2) and just one layer of foam (3)*

Из представленных графиков следует, что чувствительность γ-спектрометра ухудшается при воздействии акустической нагрузки, что и следовало ожидать. Однако, сравнивая кривые *3* на рисунках 5 и 7, следует констатировать, что поролон не оказывает какого-либо заметного защитного свойства.

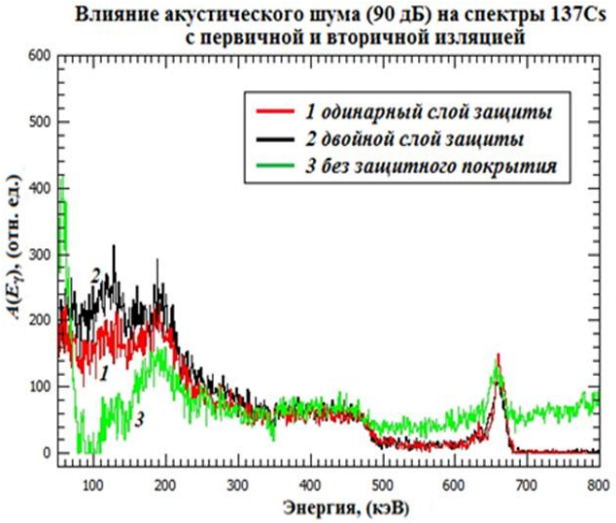


Рисунок 6. *Энергетическое разрешение ΔE/E регистрируемого спектра ^{137}Cs в зависимости от акустического шума с увеличенной толщиной защитной оболочки*

Figure 6. *Energy resolution ΔE/E of the recorded ^{137}Cs spectrum as a function of acoustic noise with increased thickness of the protective shell*

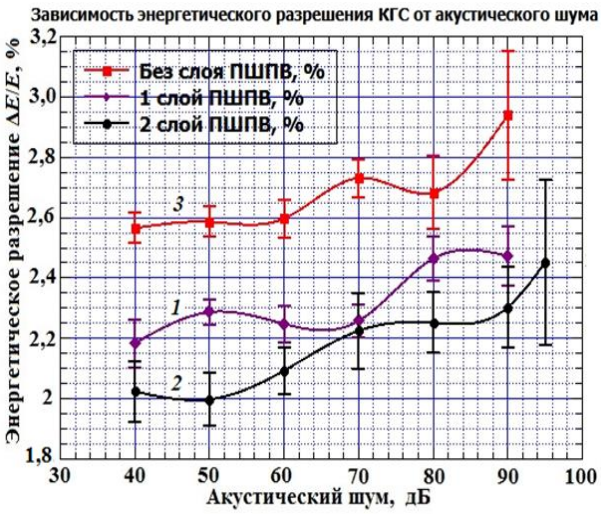


Рисунок 7. *Энергетическое разрешение ΔE/E регистрируемого спектра ^{137}Csв зависимости от акустического шума с защитными оболочками, состоящими из: одной (1), двумя (2) пористой резины и без защитной оболочки (3)*

Figure 7. *Energy resolution ΔE/E of the recorded ^{137}Cs spectrum as a function of acoustic noise with protective covers consisting of: one (1), two (2) porous rubber and without protective cover (3)*

При использовании однослойной и двуслойной защиты, состоящей из пористой резины, в области пика различие слабо заметно, но в области комптоновского распределения оно хорошо наблюдается – с ростом толщины акустической защиты чувствительность КГС возрастает. Нетрудно заметить, сравнивая кривые *2* и *1* на рисунке 7, что увеличение толщины акустической защиты действует в нужном направлении: энергетическое разрешение (Δ*E*/*E*) во всей области акустической нагрузки становится меньше, а характеристики пика – значительно лучше, но, с другой стороны, увеличивается и вес детектора КГС, что представляет собой негативную сторону выбранного решения.

Альтернативное решение защиты КГС от акустической нагрузки состоит в использовании вакуумной прослойки в качестве защитной оболочки. Действительно, помещая КГС в металлическую капсулу, размеры которой выбираем несколько больше, чем габариты КГС, и откачивая из капсулы воздух, мы, таким образом, создаем вакуумную защитную оболочку, вес которой (капсулы) можно выбрать меньше веса двуслойного резинового покрытия.

Поскольку распространение звука может происходить только в упругой среде (воздухе, жидкости и т.д.) [7], то отсутствие в капсуле воздуха однозначно указывает на невозможность проникновения звуковой волны через подобную защитную оболочку, но не мешает проходить потоку γ-излучения при измерении его спектрального состава, однако это утверждение, хотя и обоснованное соответствующей ссылкой, тем не менее требует экспериментальной проверки.

Таким образом, универсальным средством поглощения акустической нагрузки, действующей на КГС при проведении γ-спектрометрических измерений может служить дополнительное устройство в виде вакуумной камеры с тонкими стенками, в которую следует помещать ксеноновый γ-спектрометр, и откачивать из нее воздух, обеспечивая защиту КГС вместо пористой резины, «вакуумной оболочкой», которая образуется при отсутствие упругой среды – воздуха в капсуле. Немаловажно, что подобный метод защиты отличается простотой, доступностью и не требует больших финансовых затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Родионов И.А., Елохин А.П. Методы оценки радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности при использовании беспилотного дозиметрического комплекса. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022:12(1):6–23. https://doi.org/10.26583/gns-2022-01-01

Rodionov I.A., Elokhin A.P. Methods of assessing radioactive contamination of underlying surface using unmanned dosimeter system. *Global nuclear safety.* 2022:12(1):6–23. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2022-01-01

2. Елохин А.П., Рау Д.Ф., Пархома П.А. Способ дистанционного определения концентрации радионуклидов в воздушном выбросе радиационно-опасных предприятий и устройство его осуществления. Федеральный институт промышленной собственности России. Патент № 2299451. 2006. Бюл. №14 (III ч.). С. 604–605. Режим доступа: https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=RU29480748 (дата обращения 30.08.2023).

3. Елохин А.П., Жилина М.В., Рау Д.Ф., Пархома П.А. Способ дистанционного измерения загрязнения радионуклидами подстилающей поверхности в следе радиоактивного выброса радиационно-опасных предприятий и система для его осуществления. Федеральный институт промышленной собственности России. Патент № 2388018. 2010. Бюл. №12 (IV ч.). С. 947. Режим доступа: https://www.freepatent.ru/patents/2388018 (дата обращения 30.08.2023).

4. Улин С.Е., Дмитренко В.В., Грачев В.М. и др. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне для обнаружения и идентификации радиоактивных и делящихся материалов. *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ.* 2010;114:43–50. Режим доступа: https://jurnal.vniiem.ru/text/114/43.pdf (дата обращения 03.09.2023).

Ulin S.E., Dmitrenko V.V., Grachev V.M., etc. Compressed xenon gamma-ray spectrometers for the detection and identification of radioactive and fissile materials. Electromechanical matters. VNIIEM studies. 2010;114:43–50. (In Russ.). Available at: https://jurnal.vniiem.ru/text/114/43.pdf (accessed: 03.09.2023).

5. Елохин А.П., Улин С.Е., Маджидов А.И., Рахматулин А.Б., Шустов А.Е. Влияния техногенного акустического фона на показания ионизационной камеры при регистрации γ-излучения. Сборник научных статей по материалам XXXV Всероссийской научно-технической конференции XXXV Всероссийская международная научно-техническая конференция (ПАУТС−2023), 17-19 октября. 2023. Пенза Издательство ПГУ. 2023. Т.1. С. 129–141.

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

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

7. Лепендин Л.Ф. Акустика. Москва: Высшая школа, 1978. 448 с. Режим доступа: https://alexandr4784.narod.ru/lependin.html (дата обращения: 30.08.2024).

Lependin L.F. Acoustics. Moscow: Higher School. 1978, 448 p. (In Russ.). Available at: https://alexandr4784.narod.ru/lependin.html (accessed: 30.08.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:
Маджидов А.И. – проведение эксперимента;
Улин С.Е. – постановка задачи, редактирование текста и участие в проведении эксперимента;
Елохин А.П. – написание статьи, математическая реализация решения задачи, участие в проведении эксперимента;
Шустов А.Е. – проведение эксперимента.

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Majidov A.I. – conducting an experiment;
Ulin S.E. – setting the problem, editing the text, and participating in the experiment;
Elokhin A.P. – writing a paper, mathematical implementation of the problem solution, participation in the experiment;
Shustov A.E. – conducting an experiment.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

FUNDING:
The authors state that there are no sources of funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:
No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Азизбек Истамович Маджидов, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.
Александр Прокопьевич Елохин, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Azizbek I. Majidov, The post-graduate student, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation
Alexander P. Elokhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Associate Member of Russian Academy of Natural

ядерный университет «МИФИ», член-корреспондент РАЕ, г. Москва, Российская Федерация.
http://orcid.org/0000-0002-7682-8504
WoS ResearcherID: F-9573-2017
e-mail: elokhin@yandex.ru

Сергей Евгеньевич Улин, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0001-6737-7070
e-mail: seulin@gmail.com

Александр Евгеньевич Шустов, старший преподаватель, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0001-9795-3753
e-mail: aeshustov@mephi.ru

History, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.
http://orcid.org/0000-0002-7682-8504
WoS ResearcherID: F-9573-2017
e-mail: elokhin@yandex.ru

Sergey E. Ulin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0001-6737-7070
e-mail: seulin@gmail.com

Alexander E. Shustov, Senior Lecturer, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0001-9795-3753
e-mail: aeshustov@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 23.09.2024
После доработки / Revised 02.12.2024
Принята к публикации / Accepted 05.12.2024

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

УДК 620.179.13: 621.311.25
https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04
EDN QWREXO
Оригинальная статья / Original paper

Градиентный метод идентификации структурных неоднородностей в электрическом контроле оборудования, изделий и материалов

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

[1] *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация*
[2] *Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Российская Федерация*
[3] *Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Российская Федерация*
✉ *VISurin@mephi.ru*

Аннотация. Разработан градиентный метод идентификации структурных неоднородностей в объектах контроля промышленного оборудования и изделий на основе анализа распределения электрического потенциала внутри одиночного рефлекса. Расчетно-графический метод был применен для анализа результатов электрического контроля оборудования АЭС при его изготовлении. Рассматриваемая цель исследования заключалась в определении степени воспроизводимости результатов электрического контроля и разработке для этого универсального цифрового идентификатора структурных неоднородностей. Одиночные рефлексы характеризуются внутренним давлением и распределением электрического потенциала, который имеет градиент. На потенциограммах одиночные рефлексы выделяли методом электрофизической хроматографии с помощью двойной амплитудной дискриминации по разработанным программным кодам. Возникновение картин распределения потенциалов на поверхности контролируемого изделия связано с наличием в нем неоднородных полей внутренних напряжений и деформаций. Для определения локального значения внутреннего давления в структурных неоднородностях оценивали значение плотности энергии. Эту оценку для одиночных рефлексов получали, используя значение плотности электронов в металлах и сплавах. Величина градиента соответствует напряженности электрического поля вокруг рефлекса. На поверхности одиночный рефлекс представляет собой фигуру из концентрических шестиугольников или других геометрических фигур. В объемном изображении рефлекс имеет вид пирамиды, в основании которой заключена определенная фигура. Шестиугольная форма рефлекса связана с квазиравновесным распределением нормальных и касательных напряжений вокруг точечной неоднородности. Для уровня фиксации в интервале ($0 \le SLS < 1$) значение внутреннего давления в сталях близко к пределу прочности, для интервала отрицательных значений ($-0{,}7 \le SLS < -0{,}4$) – к пределу текучести.

Ключевые слова: электрический неразрушающий контроль, электрофизическая хроматография, протяженные и одиночные рефлексы,

Для цитирования: Сурин В.И., Иваний М.Б., Щербаков А.А., Щербань А.С., Павличенко А.В., Томилин С.А., Жидков М.Е., Гоок А.Э. Градиентный метод идентификации структурных неоднородностей в электрическом контроле оборудования, изделий и материалов. *Глобальная ядерная безопасность.* 2024;14(4):34–41. https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04

For citation: Surin V.I., Ivanov M.B., Shcherbakov A.A., Shcherban A.S., Pavlichenko A.V., Tomilin S.A., Zhidkov M.E., Gok A.E. Gradient method of structural heterogeneity identification in electrical inspection of equipment, products and materials. *Global nuclear safety.* 2024;14(4):34–41. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-04

© Сурин В.И., Иваний М.Б., Щербаков А.А. и др., 2024

Gradient method of structural heterogeneity identification in electrical inspection of equipment, products and materials

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

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

Abstract. A gradient method of structural inhomogeneities identification in the objects of industrial equipment and products control based on the analysis of electric potential distribution inside a single reflex is developed. The computational and graphic method is applied to analyze the results of electrical control of NPP equipment during its manufacture. The research objective under consideration is to determine the degree of reproducibility of electrical inspection results and to develop for this purpose a universal digital identifier of structural inhomogeneities. Single reflexes are characterized by internal pressure and distribution of electric potential, which has a gradient. Single reflexes on potentiograms are isolated by electrophysical chromatography with the help of double amplitude discrimination using developed program codes. The emergence of potential distribution patterns on the surface of the controlled product is associated with the presence of inhomogeneous fields of internal stresses and deformations in it. To determine the local value of internal pressure in structural inhomogeneities, the value of energy density was estimated. This estimation for single reflexes is obtained using the value of electron density in metals and alloys. The magnitude of the gradient corresponds to the electric field strength around the reflex. On the surface, a single reflex represents a figure of concentric hexagons or other geometric figures. In the volumetric image, the reflex has the form of a pyramid with a certain figure at its base. The hexagonal shape of the reflex is associated with a quasi-equilibrium distribution of normal and tangential stresses around the point heterogeneity. The value of internal pressure in steels for the fixation level in the interval (0≤ SLS <1) is close to the strength limit, for the interval of negative values (-0,7 ≤ SLS < -0,4) – to the yield strength.

Keywords: electrical nondestructive testing, electrophysical chromatography, extended and single reflexes.

Введение

Практическое использование метода сканирующей контактной потенциометрии на промышленных предприятиях Российской Федерации говорит о необходимости разработки универсального цифрового каталога или идентификатора в целях быстрого и эффективного определения характеристик обнаруживаемых дефектов. В особой степени важности этот вопрос касается предприятий атомного энергетического машиностроения и ряда других высокотехнологичных отраслей промышленности.

Результаты электрофизических измерений показывают, что рефлексы от протяженных структурных неоднородностей, таких как непровар корня сварного соединения, смещение кромок свариваемых поверхностей или шлифовальные полосы на поверхности представляют собой объединение многих одиночных рефлексов. Применение математических методов обработки результатов контроля позволяет выделить и подробно исследовать эти типы рефлексов.

По определению градиент поля на поверхности определяется выражением (1):

$$grad\varphi(x,y) = \frac{\partial\varphi}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\mathbf{j}, \quad (1)$$

где **i** и **j** – единичные векторы вдоль осей x и y. Величина градиента в каждой точке поверхности описывается выражением (2):

$$|grad\varphi| = \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2}. \quad (2)$$

В общем виде напряженность электрического поля удовлетворяет уравнению Максвелла (3) [1]:

$$\mathbf{E} = -grad\varphi - \frac{\partial \mathrm{A}}{\partial t}, \quad (3)$$

где второй член справа соответствует производной векторного потенциала **A** по времени.

Поскольку скорость сканирования составляет несколько миллиметров в секунду, релятивистскими эффектами и влиянием второго члена в выражении (3) можно пренебречь.

В соответствии с теорией контактной потенциометрии [2] на распределение потенциала в области точечного рефлекса влияют следующие факторы:

– электрическое и магнитное поле;
– волны механических напряжений;
– автоволновые процессы.

Причинно-следственная связь возникновения электрических рефлексов объясняется неоднородной поверхностной деформацией, возникающей под действием внешней нагрузки.

Напряженность электрического поля на поверхности образца, так же, как и электрический потенциал демонстрирует крайне неоднородный характер. Дивергенция напряженности электрического поля в точке с условными координатами (x_0, y_0) определяется выражением (4):

$$div\mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y}. \quad (4)$$

Внутри одиночного рефлекса имеет место определенное распределение потенциала.

Исследование структурных неоднородностей при полном разделении рефлексов

На рисунке 1 с левой стороны показан рефлекс равновесной микроскопической трещины [3].

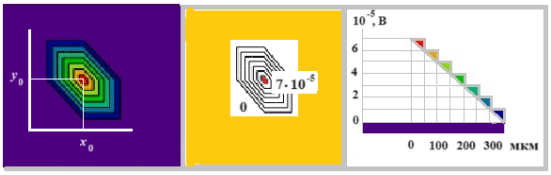


Рисунок 1. *Рефлекс микроскопической трещины (слева), распределение электрического потенциала внутри рефлекса (в центре) и цветовая градиентная лестница изменения потенциала в зависимости от расстояния (справа)*

Figure 1. *Microscopic crack reflex (left), electric potential distribution within the reflex (centre) and colour gradient staircase of potential change as a function of distance (right)*

В средней части рисунка 1 показано распределение потенциала внутри фигуры с максимальным значением «$7 \cdot 10^{-5}$ В» в ее центре, и нулевым значением на периферии. Справа показаны ступеньки цветовой градиентной лестницы изменений потенциала в зависимости от расстояния x. Лестница может иметь различное число ступенек. Как следует из приведенных рисунков электрический потенциал на поверхности является функцией координат $\varphi(x, y)$.

Потенциал уменьшается от центра фигуры к ее периферии на величину, примерно равную, 10 мкВ на 50 мкм длины ступеньки, как вдоль оси x, так и вдоль оси y, или, другими словами, падение потенциала от центра к периферии составляет 70 мкв на 350 мкм.

Для зародышевой трещины в тонкой пластине распределение потенциала двумерно. Для объемных тел и распределение потенциала и напряженность электрического поля будут зависеть от трехмерных пространственных координат (x, y, z). Результаты электрофизической томографии показывают, что протяженные неоднородности в объемных образцах проецируются на внешние поверхности в виде двумерных геометрических фигур.

В соответствии с выражениями (1) и (2) для рефлекса микротрещины получим в системе СИ:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \approx \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} = 0{,}2 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Поскольку $\partial\varphi/\partial x = \partial\varphi/\partial y$, значение модуля градиента $|grad\varphi| = 0{,}28$ В/м. На рисунке 1 вектор направлен от фиолетовой области рефлекса к красному центру.

В данном случае дивергенция имеет положительное значение, поскольку в центре рефлекса находится точечный источник электрического поля и поэтому расхождение больше нуля.

Для определения локального значения внутреннего давления в структурных неоднородностях необходимо знать соответствующее значение плотности энергии. Энергия основного состояния системы взаимодействующего неоднородного электронного газа E_S имеет вид выражения (5) [4,5]:

$$E_S = \int \upsilon(\mathbf{r}) n(\mathbf{r}) d\mathbf{r} + \frac{1}{2} \int\int [\, n(\mathbf{r})\, n(\mathbf{r}')/|\, \mathbf{r}-\mathbf{r}'\,|\,] \times d\mathbf{r} \times d\mathbf{r}' + G[n], \quad (5)$$

где $n(\mathbf{r})$ – плотность электронов в некоторой точке кристаллической решетки;

$\upsilon(\mathbf{r})$ – внешний статический потенциал;

$G[n]$ – функционал электронной плотности, который имеет различные приближения в зависимости от поставленной задачи. Данное уравнение решается методом последовательных итераций и позволяет получать удо-

влетворительные результаты в различных приложениях.

Будем использовать приближение Томаса-Ферми для неоднородного электронного газа [6], в котором величина внутриатомного давления p в объеме $d\upsilon$ определяется выражением (6):

$$p = -\frac{dE_V}{d\upsilon}, \quad (6)$$

где E_V – энергия электронов в заключенном объеме.

Внутреннее давление связано с объемной плотностью энергии и имеет следующие оценки для металлов. Для упругой деформации «сжатия – растяжения» плотность упругой энергии описывается формулой (7):

$$U_{\text{упр}} = \frac{E_{\text{упр}} \cdot \varepsilon^2}{2}, \quad (7)$$

где $E_{\text{упр}}$ – модуль упругости;

ε – относительная деформация.

Плотность кинетической энергии T электронного газа с энергией Ферми ε_Fпри температуре абсолютного нуля описывается выражением (8) [7]:

$$T = \frac{3}{5} n \varepsilon_F. \quad (8)$$

Используя результаты предшествующих исследований [8], можно показать, что в области структурной неоднородности величина давления, или внутреннего напряжения, является функцией электрического потенциала, выражение (9):

$$p(\varphi) = en\varphi, \quad (9)$$

где e – заряд электрона;

n – плотность электронов.

При этом предполагается, что при деформировании рассматриваемый объем не изменяется. Поскольку источники отличаются мощностью излучения, для величины потенциала необходимо указывать уровень фиксации, выражение (10):

$$p(\varphi_{SLS}) = en\varphi_{SLS}, \quad (10)$$

или в другой форме записи, выражение (11):

$$p_{SLS} = en\varphi_{SLS}. \quad (11)$$

Оценку внутреннего давления для одиночных рефлексов можно получить, используя плотность электронов в металлах и сплавах n~10^{28} м^3 [8]. Для уровня фиксации в интервале ($0 \le SLS < 1$) значение внутреннего давления в сталях близко к пределу прочности, для интервала отрицательных значений ($-0{,}7 \le SLS < -0{,}4$) – к пределу текучести, где $SLS = lg\varphi$ и значение φ в вольтах. В таблице 1 сравниваются расчетные значения плотности энергии, полученные с помощью выражений (7)–(11).

Таблица 1. *Плотность энергии в металлах, МДж/м^3 (МПа)*
Table 1. *Energy density in metals, MJ/m^3 (MPa)*

Растяжение-сжатие в упругой области	Электронный газ при нуле Кельвина	Структурная неоднородность
0,001	600	SLS = -1: 160
		SLS = -0,7: 320
		SLS = -0,5: 480

Семейства рефлексов, образующихся в результате шлифования поверхности сварного соединения

На рисунке 2*а* показана потенциограмма сварного соединения двух стальных пластин (сталь 12Х18Н10Т), толщиной 13,5 мм, выполненного ручной дуговой сваркой [9,10]. На потенциограмме видны две полосы с левой и правой стороны. Полосы относится к типу рефлексов «горка».

При внимательном рассмотрении узкой центральной красно-оранжевой полосы, в левой части потенциограммы, можно заметить, что небольшие участки полосы красного цвета при увеличении уровня фиксации образуют отдельные одиночные рефлексы. То же самое можно сказать и про узкую оранжево-желтую полосу в центральной части потенциограммы. Таким образом, с увеличением уровня фиксации полоса распадается на отдельные рефлексы, принадлежащие одной группе или одному семейству рефлексов, поскольку они образованы в результате шлифования поверхности.

Применяя узкополосную фильтрацию, начиная с интервала SLS = 3,004–3,699, можно определить и число отдельных структурных неоднородностей, принадлежащих данному семейству рефлексов.

В правой части нижнего рисунка 2*в* показаны две группы одиночных рефлексов, принадлежащих различным семействам. Рефлексы, расположенные ближе к продольной оси сварного соединения, имеют положительные значения потенциала и относятся к семейству рефлексов полосы шлифования. Три рефлекса, расположенные ниже и правее, характеризуются отрицательными значениями потенциала и принадлежат другому

семейству. Наблюдается также и перекрытие некоторых рефлексов.

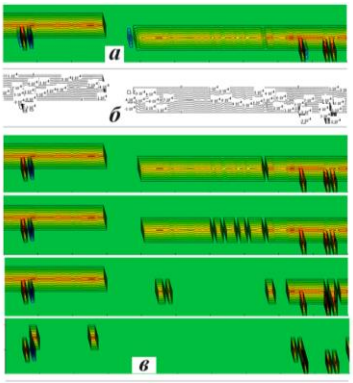


Рисунок 2. *Потенциограмма полосы, образованной на поверхности сварного соединения в результате шлифования (а); карта электрических потенциалов (б); разделение полосы на отдельные точечные рефлексы (в)*
Figure 2. *Potentiogram of the strip formed on the surface of the welded joint as a result of grinding (a); electric potential map (b); separation of the strip into separate point reflexes (c)*

Распределение потенциала внутри рефлекса семейства полосы шлифования показано на рисунке 3.

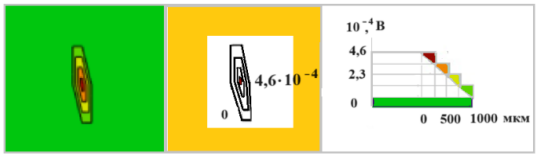


Рисунок 3. *Одиночный рефлекс, образованный шлифованием сварного соединения (слева), распределение электрического потенциала внутри рефлекса (в центре) и цветовая лестница изменения потенциала в зависимости от расстояния (справа)*
Figure 3. *Single reflex formed by grinding a welded joint (left), distribution of electric potential within the reflex (centre) and colour ladder of potential change as a function of distance (right)*

Как видно из рисунка потенциал по оси x уменьшается от центра к периферии на величину, примерно $1{,}15\cdot10^{-4}$В на 250 мкм длины ступеньки. По оси y падение потенциала от центра к периферии составляет $1{,}15\cdot10^{-4}$ В на 1,5 мм длины соответствующей ступеньки. Таким образом, в соответствии с выражением (2) получим:

$$\partial\varphi/\partial x = 0{,}46 \text{ В/м},\ \partial\varphi/\partial y = 0{,}077 \text{ В/м},$$
$$\text{и } |grad\varphi| = 0{,}47 \text{ В/м}.$$

Волнистость и шероховатость поверхности являются главными параметрами, влияющими на распределение электрического потенциала. Среднее значение параметра шероховатости на шлифованной поверхности сварного соединения составляет Ra = 1,299 мкм.

Градиенты потенциалов были рассчитаны для потенциограмм, полученных в работах [11–13]. На рисунке 4 приводятся результаты контроля сварного соединения, выполненного сваркой трением. Так же, как и в предыдущем случае на потенциограмме видна широкая полоса, которая относится к типу рефлексов «горка-впадина», поскольку ниже полосы располагаются обширные темные пятна с отрицательными значениями потенциала (рис. 4*а*). Одиночные рефлексы можно также разделить на два типа «пирамиду» и «воронку».

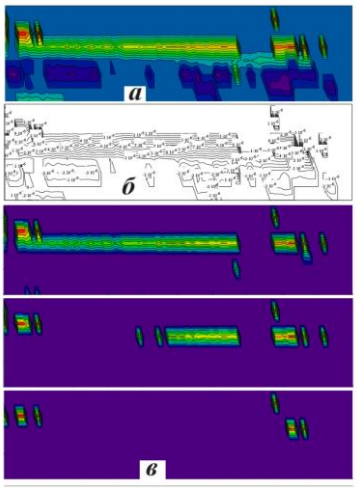


Рисунок 4. *То же, что на рисунке 1 для образца со сварным швом, выполненным сваркой трением. Интервал уровней фиксации SLS=5-5,699*
Figure 4. *Same as Figure 1 for a sample with a friction weld. Interval of fixation levels SLS=5-5,699*

Проделав аналогичную процедуру для сварного соединения, выполненного сваркой трением (рис. 5), получим:

$$\partial\varphi/\partial x = 0{,}016 \text{ В/м},\ \partial\varphi/\partial y = 0{,}004 \text{ В/м},$$
$$\text{и } |grad\varphi| \approx 0{,}016 \text{ В/м}.$$

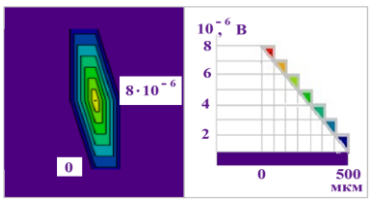


Рисунок 5. *Одиночный рефлекс, образованный шлифованием соединения сваркой трением (слева) и цветовая лестница градиента потенциала (справа)*
Figure 5. *Single reflex formed by grinding the joint by friction welding (left) and colour ladder of the potential gradient (right)*

Для данной сварки среднее значение параметра шероховатости на шлифованной поверхности сварного соединения составляет $Ra = 0{,}501$ мкм. Сравнивая результаты двух сварных соединений и измеренные значения шероховатости можно сделать вывод, что с увеличением шероховатости поверхности возрастает и градиент потенциала или напряженность электрического поля вокруг рефлекса.

На рисунке 6 приведен пример непровара корня сварного соединения и характеристики одиночного рефлекса. Значение градиента в данном случае равно $|grad\varphi| \approx 0{,}06$ В/м.

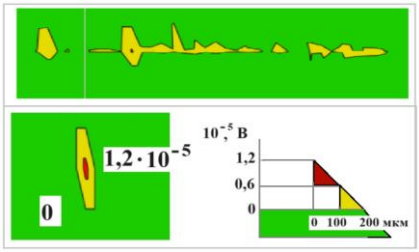


Рисунок 6. *Непровар корня (вверху), одиночный рефлекс, образованный непроваром и цветовая лестница градиента потенциала (внизу)*
Figure 6. *Unwelded root (top), single reflex formed by the unweld and colour ladder of the potential gradient (bottom)*

Заключение

Описанный градиентный метод электрофизической хроматографии позволяет идентифицировать рефлексы, происходящие от различных структурных неоднородностей, по распределению потенциала внутри них.

Для этого необходимо с помощью метода математической фильтрации разделить протяженные рефлексы, относящиеся к протяженным структурным неоднородностям, на одиночные. Протяженные рефлексы могут относиться к различным семействам: полосам шлифования, непроварам, смещению кромок сварного соединения и другим.

Одиночные рефлексы характеризуются внутренним давлением и распределение электрического потенциала, который имеет градиент. Величина градиента соответствует напряженности электрического поля вокруг рефлекса. На поверхности рефлекс представляет собой фигуру из концентрических шестиугольников. В объемном изображении рефлекс имеет вид пирамиды, в основании которой также лежит шестиугольник.

Для различных семейств рефлексов получены значения напряженности электрического поля в интервале от 0,016 до 0,47 В/м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. Москва: Наука, 1988. 512 с. Режим доступа: https://djvu.online/file/7yKdiaQMEUkVZ?ysclid=m1ozwi9qqu4986992 (дата обращения: 10.09.2024).

2. Сурин В.И., Иваний М.Б., Волкова З.С., Щербаков А.А. Конструирование приборов и установок электрического неразрушающего контроля. Часть 1. Теоретические основы контактной потенциометрии. Москва: НИЯУ МИФИ, 2024. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=iknlas (дата обращения: 07.09.2024).

3. 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. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37057859 (дата обращения: 07.09.2024).

Surin V.I., Polskij V.I., Osintsev A.V., Dzhumaev P.S. Applying scanning contact potentiometry for monitoring incipient cracks in steels. *Russian journal of nondestructive testing.* 2019;55(1):59–67. Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=38684089 (accessed: 07.09.2024).

4. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas. *Physical Review.* 1964;136:B864–B871. https://doi.org/10.1103/PhysRev.136.B864

5. Kohn W., Sham L.J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical Review.* 1965;140:A1133–A1138. https://doi.org/10.1103/PhysRev.140.A1133

6. Kohn W., Lang N.D., Lundqvist S., March N.H., Vashishta P., Bart U., Williams A.R. Theory of the inhomogeneous electron gas. New York: Plenum Press, 1983. Available at: https://archive.org/details/theoryofinhomoge0000unse/page/n7/mode/2up (accessed 05.09.2024).

7. Kittel Ch. Introduction to solid state physics. 8th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. Available at: http://metal.elte.hu/~groma/Anyagtudomany/kittel.pdf (accessed: 10.09.2024).

8. Баранов В.М., Евстюхин Н.А., Сурин В.И. К теории ЭДС, наведенной деформацией металлов и сплавов. Сборник научных трудов. Научная сессия МИФИ-2003. 2003;9:122–124. Режим доступа: http://library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2003/9/122.html (дата обращения: 07.09.2024).

9. Alwaheba A.I., Surin V.I., Ivanova T.E., Ivanov O.V., Beketov V.G., Goshkoderov V.A. Detection of defects in a welded joint by scanning contact potentiometry. Nondestructive testing and evaluation. 2021;36(3):261–277. https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1740702

10. Surin V.I., Alwaheba A.I., Beketov V.G., Abu Gazal A.A. Alternative method of non-destructive testing for nuclear power plant. International conference on physics of reactors: Transition to a scalable nuclear future. PHYSOR 2020. EPJ Web of Conferences. 2021;247:11002. https://doi.org/10.1051/epjconf/202124711002

11. Щербань А.С., Михайлевский Д.А., Павличенко А.В., Томилин С.А. Технологические особенности ультразвукового контроля сварных соединений из стали аустенитного класса марки 10Х15Н9С361-Ш (ЭП302-Ш). Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции. Том 1. Балаково, 2024. С. 194–201. Режим доступа: https://biti.mephi.ru/wp-content/uploads/2024/07/TOM-I.pdf (дата обращения: : 07.09.2024).

12. 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;2(47):39–49. EDN: TFDGAT. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-05

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;(2):39–49. (In Russ.). EDN: TFDGAT. https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-05

13. Сурин В.И., Щербань А.С., Щербаков А.А., Жидков М.Е., Томилин С.А., Иваний М.Б. Обоснование применимости метода сканирующей контактной потенциометрии для контроля оборудования АЭС при его изготовлении. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(1):36–53. https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-04

Surin V.I., Shcherban A.S., Shcherbakov A.A., Zhidkov M.E., Tomilin S.A., Ivanyi M.B. Justification of scanning contact potentiometry applicability to test NPP equipment during its manufacture. *Global nuclear safety*. 2023;13(1):36–53. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-04

ВКЛАД АВТОРОВ:

Сурин В.И. – формулировка идеи и целей исследования, участие в планировании и проведении исследований;

Иваний М.Б. – метрологическое обеспечение результатов исследования, разработка математической модели;

Щербаков А.А. – первичная обработка результатов исследования, выявление закономерностей, проведение расчетов и подготовка заключения;

Щербань А.С. – планирование и подготовка исследования в заводских условиях, участие в проведении исследования и обсуждении результатов;

Павличенко А.В. – подготовка методической и аппаратурной части для проведения исследований, участие в проведении исследования и обработке экспериментальных результатов;

Томилин С.А. – участие в обсуждении результатов, представление экспериментальных результатов с использованием методологии контактной потенциометрии;

Жидков М.Е. – формулировка идеи и целей исследования, обсуждение результатов, утверждение плана проведения исследования в заводских условиях;

Гоок А.Э. – разработка модели градиента потенциалов, обработка экспериментальных данных с использованием модели и выявление закономерностей.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Surin V.I. – formulation of the idea and goals of the study, participation in planning and conducting research;

Ivany M.B. – metrological support of research results, development of a mathematical model;

Shcherbakov A.A. – primary processing of research results, identifying patterns, carrying out calculations and preparing a conclusion;

Shcherban A.S. – planning and preparation of research in factory conditions, participation in conducting research and discussing results;

Pavlichenko A.V. – preparation of methodological and instrumental parts for conducting research, participation in conducting research and processing experimental results;

Tomilin S.A. – participation in the discussion of the results, presentation of experimental results using the methodology of contact potentiometry;

Zhidkov M.E. – formulation of the idea and goals of the study, discussion of the results, approval of the plan for conducting the study in the factory;

Gook A.E. – development of a potential gradient model, processing of experimental data using the model and identifying patterns.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Работа выполнена без привлечения дополнительных источников финансирования.

FUNDING:
No additional finding is involved in the research.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:
The authors declare no relevant conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

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

Михаил Борисович Иваний, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.
https://orcid.org/0009-0005-9574-9165
e-mail: MBIvanyi@mephi.ru

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

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

Александр Викторович Павличенко, инженер по дефектоскопии I категории отдела неразрушающих методов контроля блока по качеству Волгодонского филиала АО «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
e-mail: pavlichenko_avh@atommash.ru;

Сергей Алексеевич Томилин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0001-8661-8386
e-mail: SATomilin@mephi.ru

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

Андрей Эдуардович Гоок, начальник центра профессиональных компетенций блока по управлению персоналом Волгодонского филиала АО «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии «Атоммаш», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
e-mail: gook_ae@atommash.ru

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

Mikhail B. Ivanyi, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.
https://orcid.org/0009-0005-9574-9165
e-mail: MBIvanyi@mephi.ru

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

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

Alexander V. Pavlichenko, category I flaw detection engineer of the department of non-destructive methods of unit quality control of the Volgodonsk branch of JSC Engineering Company AEM Technologies Atommash, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
e-mail: pavlichenko_avh@atommash.ru;

Sergey A. Tomilin, Cand. Sci. (Eng.), Head and Associate Professor Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0001-8661-8386
e-mail: SATomilin@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

Andrey E. Gook, Head of the Professional Competence Center of the Personnel Management Unit of Atommash branch of AEM-technologies JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
e-mail: gook_ae@atommash.ru

Поступила в редакцию / Received 13.09.2024
После доработки / Revised 10.12.2024
Принята к публикации / Accepted 12.12.2024

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

УДК 519.87 : 539.374
https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-05
EDN ROFQTO
Оригинальная статья / Original paper

Исследование математических моделей упругопластических материалов

А.И. Балябин [1], С.И. Герасимов [1,2,3] ✉, Д.А. Ладин [1,2], С.А. Маскайкин [1], Д.Ю. Смирнов [1,2], Т.С. Шаброва [1]
[1]*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация*
[2]*Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Саров, Нижегородская обл., Российская Федерация*
[3]*Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород, Российская Федерация*
✉ *s.i.gerasimov@mail.ru*

Аннотация. Цель настоящей статьи состоит в исследовании вопросов представления математических упругопластических моделей материала с учетом имеющихся реологических свойств и их связи с конечно-элементной моделью в современных программных комплексах численного моделирования. В статье приведены результаты численного моделирования процессов деформирования материалов, диаграммы деформирования материалов, аналитические методы аппроксимации диаграмм деформирования. Представлен один из аналитических методов по восстановлению диаграммы Прандтля – метод, использующий коэффициент Рамберга-Осгуда, включающий в себя величины справочных параметров о материале, такие как модули упругости, предел прочности, предел текучести, критерии разрушения, относительное удлинение и относительное утонение. Приведены описание и результаты численного моделирования разрушения материалов, моделирования пластической неустойчивости, предшествующей разрушению, результаты исследования по установлению сеточной сходимости. Приведена процедура верификации численной модели материала, представляющей собой калибровочные тесты параметров модели одноосного разрыва образцов.

Ключевые слова: пластическая деформация, сдвиговая деформация, одноосное растяжение, аппроксимация Рамберга-Осгуда, численное моделирование, нагружение, пластичность, регуляризационная кривая, сеточная сходимость, предел прочности.

Для цитирования: Балябин А.И., Герасимов С.И., Ладин Д.А., Маскайкин С.А., Смирнов Д.Ю., Шаброва Т.С. Исследование математических моделей упругопластических материалов. *Глобальная ядерная безопасность.* 2024;14(4):42–54. https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-05

For citation: Balyabin A.I., Gerasimov S.I., Ladin D.A., Maskaikin S.A., Smirnov D.Y., Shabrova T.S. Study of mathematical models of elastoplastic materials. *Global nuclear safety.* 2024;14(4):42–54. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-05

Study of mathematical models of elastoplastic materials

Andrey I. Balyabin [1], Sergey I. Gerasimov[1,2,3] ✉, Dmitry A. Ladin [1,2], Sergey A. Maskaikin [1], Dmitry Y. Smirnov [1,2], Tatyana S. Shabrova[1]
[1]*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation*
[2]*Sarov Institute of Physics and Technology the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Sarov, Nizhny Novgorod region, Russian Federation*
[3] *Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation*
✉ *s.i.gerasimov@mail.ru*

© Балябин А.И., Герасимов С.И., Ладин Д.А. и др., 2024

Abstract. The objective of this article is to study the issues of mathematical elastic-plastic models of a material taking into account the available rheological properties and their connection with the finite element model in modern software complexes of numerical modeling. The article presents the results of numerical modeling of deformation processes of materials, deformation diagrams of materials, analytical methods for approximating deformation diagrams. One of the analytical methods of the restoration of the Prandtl diagram is presented, a method using the Ramberg-Osgood coefficient, which includes the values of reference parameters about the material, such as elastic modulus, tensile strength, yield strength, fracture criteria, elongation and relative thinning. The description and results of numerical modeling of the material destruction, modeling of plastic instability preceding the destruction, and the results of a study to establish grid convergence are presented. The procedure of verifying the numerical model of the material, which is a calibration tests of sample uniaxial rupture model parameters, is given.

Keywords: plastic deformation, shear deformation, uniaxial tension, Ramberg-Osgood approximation, numerical modeling, loading, plasticity, regularization curve, grid convergence, tensile strength.

Введение

Современные методы численного моделирования, реализованные в программных комплексах, являются основным инструментом инженерного анализа при проектировании и оценке надежности конструкций. Эти методы позволяют исследовать поведение материалов и элементов конструкций под воздействием внешних факторов, таких как нагрузки, температурные градиенты и другие эксплуатационные условия. Применение численных моделей стало неотъемлемой частью не только создания новых изделий, но и модернизации уже существующих конструкций, что особенно важно в высокотехнологичных и ответственных отраслях, включая атомную энергетику.

В ядерной промышленности, где безопасность конструкций является ключевым критерием, численное моделирование используется для оценки несущей способности элементов, работающих в условиях повышенных температур, радиационного облучения и динамических нагрузок. Для достоверности расчетов необходимо учитывать многочисленные критерии прочности, которые соответствуют строгим стандартам атомной отрасли. Это особенно актуально для таких процессов, как пластическое деформирование и разрушение, которые определяют долговечность и надежность конструкций.

Результаты численного моделирования во многом зависят от корректности выбора математических моделей материалов, описывающих их механическое поведение, и точности определения их параметров. Для моделирования процессов пластического деформирования важно учитывать влияние интенсивности внешних воздействий, таких как амплитуда и скорость нагрузки. Это связано с необходимостью описания реологических свойств материалов, включая упругость, пластичность и вязкость, которые определяют поведение конструкции в реальных эксплуатационных условиях.

Значимость данной работы для атомной отрасли трудно переоценить, поскольку обеспечение безопасности конструкций ядерных объектов требует учета множества факторов: от многоцикловых динамических воздействий до радиационного старения материалов. Разработка и внедрение точных упругопластических моделей, учитывающих реальные условия эксплуатации, позволяют повысить точность прогнозирования ресурса конструкций, минимизировать риски аварийных ситуаций и снизить экономические затраты на эксплуатацию и ремонт.

Целью настоящей работы является исследование математических моделей, описывающих упругопластическое поведение материалов с учетом их реологических свойств, а также их интеграция в конечно–элементные методы расчета. Это позволит повысить эффективность анализа несущей способности элементов конструкций и агрегатов, используемых в атомной промышленности, что, в свою очередь, способствует повышению общей безопасности объектов атомной энергетики.

Описание деформирования материалов в комплексах численного моделирования

Механическое поведение сплошной среды определяется ее способностью сопротив-

ляться сдвиговым и объемным деформациям, что связано с основными реологическими характеристиками материала: упругостью, пластичностью и вязкостью. Эти свойства задают основу для описания напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов под действием внешних нагрузок.

Поведение среды при нагружении описывается уравнением (1):

$$\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \varepsilon_i, \sigma_0, T, n \ldots .) , \quad (1)$$

где σ_i– интенсивность напряжений;

σ_0 – среднее напряжение;

ε_i– интенсивность деформаций;

T – температура;

n – структурный параметр.

В связи с многообразием реологических характеристик и режимов нагружения, универсальная математическая модель, способная в полной мере описать поведение металлов в широком диапазоне условий, отсутствует. Для численного анализа используются частные закономерности, которые подбираются в зависимости от исследуемого материала и конкретных задач моделирования.

В программных комплексах численного моделирования, таких как LS–DYNA, Ansys, ЛОГОС, предлагаются разнообразные математические модели. Они позволяют воспроизводить отклик конструкций под действием различных нагрузок, включая статические, динамические и термомеханические. Для атомной отрасли, где материалы подвергаются экстремальным нагрузкам и радиационным воздействиям, выбор и корректная настройка таких моделей имеет ключевое значение для обеспечения безопасности объектов.

Диаграммы деформирования материалов

На начальной стадии нагружения деформация материала подчиняется закону Гука (2):

$$\sigma = E\varepsilon , \quad (2)$$

где σ – напряжение;

E – модуль Юнга;

ε – деформация.

Упругость представляет собой способность материала восстанавливать форму после снятия нагрузки. Все материалы, поведение которых подчиняется закону Гука, являются упругими. В неупругом материале деформации после снятия нагрузки остаются. Наиболее распространенным видом неупругого поведение материала, является пластическое деформирование.

В ряде случаев необходима оценка влияния скорости деформирования и температуры на поведение материала. Для некоторых уравнений состояния [1] значимость деформаций может существенно меняться в зависимости от скорости.

В большинстве случаев анализ прочности проводится без учета влияния на механические свойства скорости деформирования (при условии статического или квазистатического нагружения).

При деформациях $\varepsilon > \varepsilon_{\text{T}}$, ($\varepsilon_{\text{T}}$ – деформация, соответствующая пределу текучести материала σ_{T}), материал переходит в пластическое состояние.

Пластические деформации не исчезают после снятия нагрузки и, таким образом, являются остаточными. Характерно, что после появления пластических деформаций достаточно небольшого увеличения напряжений для существенного роста деформаций. Это явление называется текучестью, а соответствующее напряжение называется напряжением текучести.

В современных программных комплексах [2] численного моделирования имеются несколько представлений матетематических моделей упругопластического поведения, например, простые модели деформирования материалов (рис. 1), которые учитывают лишь основные физико-механические параметры (параметры упругости первого, второго, и третьего рода, предел текучести, предел временного сопротивления) и деформационные константы (относительное удлинение, относительное утонение и др.).

Все необходимые параметры данных моделей деформирования возможно получить как исходя из результатов различных испытаний стандартных образов, так и при помощи аналитических зависимостей с учетом справочной информации о физико-механических характеристиках материала.

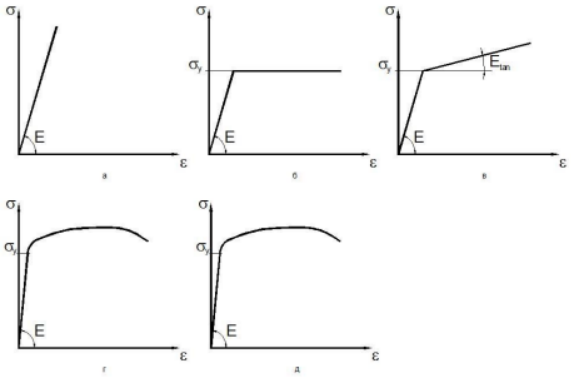


Рисунок 1. *Виды простых моделей материала: а) упругая модель; б) упругая – идеально пластическая модель; в) упругопластическая (билинейная) модель, г) упругопластическая модель в степенном виде, д) упругопластическая кусочно–линейная модель*

Figure 1. *The types of simple material model figure: a) elastic model; b) elastic–perfectly plastic model; c) elastoplastic (bilinear) model; d) elastoplastic model in power–law form; e) elastoplastic piecewise linear model.*

Для оценки механических свойств широко используются статические испытания, которые проводятся с применением разных схем напряженного состояния в образце. К основным разновидностям статических испытаний относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

Испытание на одноосное растяжение – наиболее распространенный вид испытаний для оценки свойств металлов и сплавов – сравнительно легко подвергаются анализу, позволяют по результатам одного опыта определять сразу несколько важных механических характеристик материалов, являющихся критерием его качества необходимых для конструкторских расчетов.

При отсутствии экспериментальной кривой деформирования, имея только прочностные параметры, строится кривая деформирования аналитическим путем, например, с использованием степенной аппроксимации. Затем полученная кривая верифицируется, например, по максимальному относительному удлинению образца δ и максимальному сужению в шейке после разрыва ψ.

Существуют так называемые инженерные напряжения и соответствующие им инженерные деформации, а также истинные напряжения и деформации. Инженерные деформации иногда рассматриваются как «малые» деформации. В одноосном случае инженерные напряжения и деформации определяются следующим образом (3):

$$\sigma_{\text{инж}} = \frac{P}{A}, \quad \varepsilon_{\text{инж}} = \frac{\Delta l}{l}, \tag{3}$$

где $\sigma_{\text{инж}}$ – инженерные напряжения;

P – приложенная нагрузка;

A – площадь поперечного сечения;

$\varepsilon_{\text{инж}}$– инженерные деформации;

Δl – изменение длины;

l – начальная длина.

В современных программных комплексах численного моделирования требуется задание значений напряжений и деформаций в виде истинных напряжений и деформаций. Для одномерного случая истинные деформации находятся по формуле (4):

$$\varepsilon_{\text{истн}} = ln\left(\frac{\Delta l}{l}\right), \tag{4}$$

где $\varepsilon_{\text{истн}}$ – истинные деформации;

l – текущее значение длины;

l_0– начальная длина.

Из этого соотношения видно, почему истинные деформации называются логарифмическими. Чтобы перейти от инженерных напряжений и деформаций к истинным в объемной постановке, можно использовать следующие соотношения (5):

$$\sigma_{\text{истн}} = \sigma_{\text{инж}}(1 + \varepsilon_{\text{инж}}) \tag{5}$$
$$\varepsilon_{\text{истн}} = ln(1 + \varepsilon_{\text{инж}}),$$

где $\sigma_{\text{истн}}$ – истинные напряжения.

При малых деформациях инженерные и истинные параметры практически совпадают, однако с увеличением деформаций их значения начинают существенно расходиться. Это различие необходимо учитывать при моделировании, поскольку корректное описание поведения материала требует точного представления его реальных характеристик.

Для адекватного описания деформационного поведения материала в численных расчетах требуется задать параметры, соответствующие выбранной модели материала, реализуемой в программных комплексах численного моделирования. Одним из ключевых методов для получения таких данных является использование диаграммы деформирования, полученной при одноосном растяжении.

Простое представление зависимостей, например, линейной или билинейной связи

между напряжением и деформацией (в рамках моделей идеальной упругости, идеальной пластичности или упругопластичности), широко применяется в инженерных расчетах благодаря его относительной простоте. Реализация таких зависимостей в программных средах численного моделирования, таких как LS–DYNA или ANSYS, не требует сложных вычислений. Достаточно наличия справочных данных о физико-механических свойствах материала, таких как модули упругости и пределы прочности, для построения зависимостей по линейным законам.

Однако в реальных задачах, например, при проектировании элементов конструкций атомной отрасли, зачастую отсутствуют полные данные о свойствах материала. В таких случаях инженеры вынуждены прибегать к упрощенным методикам для оценки поведения конструктивных элементов под нагрузкой. Это может включать представление деформационных зависимостей в простой форме (например, линейные или билинейные зависимости, как на рисунках 1*а*–1*в*) или использование более сложных подходов (кусочно-линейных или степенных моделей, как на рисунках 1*г*, 1*д*).

Для реализации более сложных моделей, учитывающих, например, процессы упрочнения или значительное пластическое течение, требуется значительно больше исходных данных. Такие данные могут быть получены из экспериментальных диаграмм деформирования, либо восстановлены аналитически с использованием аппроксимационных методов. Эти методы позволяют с высокой точностью описывать сложное поведение материала, включая учет зависимостей напряжений от температуры, скорости деформации и накопления повреждений. Подобные подходы критически важны для моделирования поведения элементов, используемых в экстремальных условиях, таких как компоненты атомных реакторов или конструкции, подвергающиеся высоким термомеханическим нагрузкам.

Аналитические методы аппроксимации диаграммы деформирования

Одним из подходов к определению необходимых зависимостей является аналитическое восстановление (аппроксимация) диаграммы «напряжение – деформация» на основе имеющихся справочных данных. Среди распространенных методов аппроксимации можно выделить билинейную аппроксимацию и использование зависимости Рамберга-Осгуда. Эти подходы позволяют с достаточной точностью описывать механическое поведение материалов в условиях одноосного нагружения.

В области пластических деформаций билинейная аппроксимация диаграммы деформирования предполагает разбиение зависимости на два участка: упругий и пластический. Для пластического участка напряжение на поверхности текучести определяется как функция, линейно возрастающая с увеличением пластической деформации. Такой подход упрощает численное моделирование и обеспечивает достаточную точность для инженерных расчетов, особенно в тех случаях, когда детальное экспериментальное описание диаграммы недоступно.

Метод Рамберга-Осгуда, в свою очередь, является более универсальным и позволяет описывать плавный переход от упругого к пластическому состоянию материала – выражение (6), он основывается на использовании степенной зависимости между напряжением и деформацией, что делает его применимым для материалов с более сложным поведением, включая явления упрочнения (выбор конкретного метода аппроксимации зависит от уровня требований к точности модели и объема доступной информации о свойствах материала):

$$\sigma = \sigma_{\text{т}} + E_t(\varepsilon - \varepsilon_{\text{т}}), \quad (6)$$

где E_t – модуль упрочнения по формуле (7):

$$E_t = \frac{\sigma^{\text{в}}_{\text{истн}} - \sigma^{\text{т}}_{\text{истн}}}{\varepsilon^{\text{в}}_{\text{истн}} - \frac{\sigma^{\text{в}}_{\text{истн}}}{E}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – истинное напряжения предела прочности;

$\sigma_{\text{т}}$ – истинное напряжение предела текучести;

$\varepsilon_{\text{в}}$ – деформация, соответствующая пределу прочности;

$\varepsilon_{\text{Т}}$ – деформация, соответствующая пределу текучести, выражение (8).

$$E_T = \frac{\sigma_{\text{в}}(1+1{,}4\psi\ ) - \sigma_T}{-ln(1-\psi\ ) - \varepsilon_{\text{т}}}. \quad (8)$$

Данная методика включает в себя процесс аппроксимации диаграмм деформаций [3] с нахождением показателя степени кривой по формуле (9):

$$\sigma = \sigma_{\text{в}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{в}}}\right)^{n}. \quad (9)$$

Если приравнять напряжение в критической точке к его производной, то показатель упрочнения становится равным критической деформации $n = \varepsilon_{\text{в}}$.

Связь истинных напряжений и деформаций через условные определяется выражением (10):

$$\sigma = \sigma_{\text{в}} \left(\frac{e\varepsilon}{n}\right)^{n}, \quad (10)$$

где e – основание натурального логарифма.

Данный метод имеет первое приближение кривой упрочнения за точкой локального сужения и может заменяться прямой с коэффициентом наклона, равным истинному пределу прочности.

Так же метод может включать в себя аппроксимацию экспериментальных данных средствами определения параметра упрочнения n за счет минимизации функции кривой упрочнения. В связи с чем, для более точных диаграмм требуется получение более полных экспериментальных данных.

Одним из аналитических методов по восстановлению диаграммы Прандля является вычисление с использованием коэффициента Рамберга-Осгуда, включающего в себя величины справочных параметров о материале: упругая составляющая (один из модулей упругости, модуль Юнга, и др.), предел прочности, предел текучести, критерии разрушения, относительное удлинение и относительное утонение (рис. 2).

Подход является полностью аналитическим и для оценки НДС конструкции в условия упругопластического поведения с одним из критериев разрушения не требует экспериментальных диаграмм «напряжение – деформация».

При использовании диаграмм «напряжение – деформация» в численном моделировании, как говорилось ранее, необходимо использовать истинные значения каждого из параметров. Таким образом, примерный вид диаграммы будет выглядеть как зависимость истинных напряжений от истинных деформаций с учетом линейной зоны шейкообразования (рис. 3).

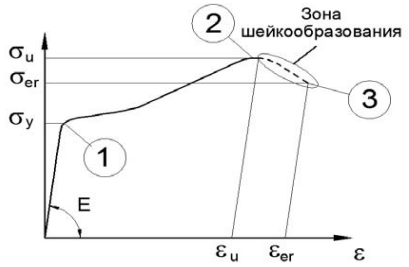


Рисунок 2. *Характерные точки на диаграмме одноосного растяжения и основные механические параметры (0-1) – упругая зона; (1-2) – зона упрочнения; (2-3) – зона шейкообразования*

Figure 2. *Characteristic points on the uniaxial tension diagram and key mechanical parameters (0-1) – elastic region; (1-2) – hardening region; (2-3) – necking region*

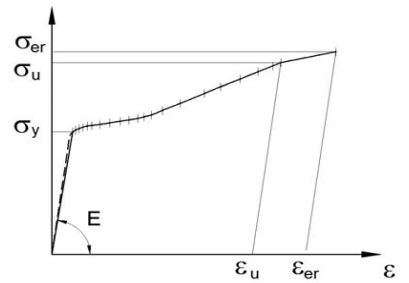


Рисунок 3. *Аппроксимация кривой растяжения кусочно-линейным графиком*

Figure 3. *The approximation of the tension curve with a piecewise linear graph*

Следующим этапом по восстановлению зависимости деформации от напряжения необходимо найти параметр, определяющий величину пластической деформации от напряжения в формуле Рамберга-Осгуда, учитывающий функцию интенсивности напряжения (11):

$$n = \frac{log\varepsilon_B - log\varepsilon_T}{log\sigma_B - log\sigma_{\text{T}}}. \quad (11)$$

После расчета параметра n определяется величина пластической деформации от напряжения, где напряжение $\sigma_i = \frac{\sigma \cdot i}{100}$ при i=1...100. Далее создается таблица $e_i = f(\sigma_i)$ истинных значений параметра для диаграммы зависимости напряжений от деформации.

Определив параметр n, представляется возможным вычисление полной зависимости пластической деформации от напряжения по следующей формуле (12):

$$\varepsilon_{\text{пласт}} = 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}}\right)^{n}. \quad (12)$$

Таким образом, имея аппроксимацию Рамберга-Осгуда возможно определить параметры модели изотропной пластичности с упрочнением по степенному закону деформирования.

Моделирование разрушения

Оценка максимально допустимой несущей способности агрегатов и конструктивных элементов в атомной отрасли часто требует анализа процессов разрушения для прогнозирования последствий отказа отдельных узлов. В связи с необходимостью учета разрушения по одному из ключевых критериев, зона шейкообразования материала может быть определена с использованием следующего выражения (13):

$$\varepsilon = ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right). \quad (13)$$

При отсутствии данных по ψ, предельная деформация может быть найдена с помощью формулы (14):

$$\varepsilon = n \times ln(1+\delta). \quad (14)$$

где n – коэффициент, подобранный экспериментально из ряда проведенных опытов, и подходит лишь для изотропных легированных сталей.

Помимо деформационных критериев разрушения, существуют кинетические модели, учитывающие накопление повреждений, а также интегральные силовые критерии, которые описывают разрушение при достижении интегральной меры напряжений критического значения [1,3,4].

Бучером Б.А.[1] и др. [5,6] был сделан вывод, что критерий разрушения должен содержать временной интервал, в течение которого в материале действует нестационарное растягивающее напряжение. Данный критерий имеет вид выражения (15):

$$\widetilde{K} = \int_0^t \left(\sigma_{\text{р}}(t) - \sigma_0\right)^n dt, \quad (15)$$

где $\sigma_{\text{р}}(t)$ – действующее напряжение как функция времени;

σ_0 – пороговое напряжение, ниже которого разрушение отсутствует при любом времени нагружения;

t – время действия напряжения выше порогового σ_0;

n – параметр, подбираемый из условия наилучшего описания экспериментальных данных.

Согласно рекомендациям специалистов[1], параметр n принимается равным 2, а σ_0 соответствует пороговому напряжению, ниже которого разрушение невозможно даже при длительном воздействии.

В рамках исследования анализировались два материала: сплав АМг6 и сталь 12Х18Н10Т. Пороговое напряжение для каждого материала принималось равным истинному значению предела прочности, которое определялось по формуле Марковца М.П. [7]. Эта методика позволила установить количественные характеристики для оценки предельного состояния материалов в условиях сложного нагружения, выражение (16):

$$\sigma_0 = \sigma_{\text{в}}(0{,}8 + 2{,}06\psi), \quad (16)$$

где σ_0 – истинное значение предела прочности;

$\sigma_{\text{в}}$ – условный предел прочности;

ψ – относительное сужение образца.

Пороговые значения напряжения для рассматриваемых материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1. *Пороговые значения напряжения*
Table 1. *Threshold stress values*

Материал	Условный предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относительное поперечное сужение ψ	Истинный предел прочности σ_0, МПа
АМг6	362	0,432	612
12Х18Н10Т	621,3	0,664	1347

Согласно критерию (1) разрушение наступит тогда, когда в элементе $\widetilde{K'} \geq \widetilde{K}$.

Критериальные параметры разрушения: для сплава АМг6 – $\widetilde{K} = 0{,}02$ Мпа$^2 \cdot$ с, для стали 12Х18Н10Т – $\widetilde{K} = 0{,}5$ Мпа$^2 \cdot$ с^2.

[1] Бучер Б.А., Баркер Л.М., Мансон Д.Е. и др. Влияние предыстории напряженного состояния на нестационарный откол в металлах. *Ракетная техника и космонавтика*. 1964;2(6):3–18.

[2] DOT/FAA/AR-MMPPS-01 Metallic Materials Properties Development. Available at: https://www.academia.edu/35071264/DOT_FAA_AR_MMPDS_01_Metallic_Materials_Properties_Development_and_Standardization_MMPDS (accessed: 28.09.2024).

Полученная зависимость будет представлять из себя зависимость пластических деформаций от напряжений – зависимость третьего рода (кривая упрочнения материала).

Исследование по установлению сеточной сходимости

Разрушению металлов, как правило, предшествует развитие пластической неустойчивости, характеризующейся возникновением неоднородностей пластического состояния и последующей локализацией пластической деформации. Одним из типичных примеров является формирование шейки в зоне концентрированной деформации при одноосном растяжении. Этот процесс обусловлен нелинейным поведением материала и сложным взаимодействием между напряжениями и деформациями в локальной области.

В численном моделировании пластической неустойчивости неизбежно проявляется зависимость результатов от плотности конечных элементов (КЭ) сетки, что связано с дискретной природой расчетной модели. После локализации деформации величина, характеризующая разрушение, становится неустранимо связанной с шагом и структурой сетки. Это особенно критично при анализе задач, где размер зоны локализации соизмерим с размерами конечных элементов.

Для иллюстрации влияния плотности КЭ-сетки можно рассмотреть модель стержня, построенную с использованием балочных элементов. Соотношения для анализа пластической деформации и устойчивости стержня в этом случае включают:

– для двух балочных элементов после локализации деформации (рис. 4*а*) имеем выражение (17):

$$\varepsilon = ln\frac{2\left(l-\frac{l_0}{2}\right)}{l_0}\ ; \qquad (17)$$

– для 4–х балочных элементов после локализации (рис. 4*б*) имеем выражение (18):

$$\varepsilon = ln\frac{4\left(l-\frac{3l_0}{4}\right)}{l_0}; \qquad (18)$$

– для n – балочных элементов (рис. 4*в*) имеем выражение (19):

$$\varepsilon = ln\frac{n\left(l-\frac{(n-1)l_0}{n}\right)}{l_0}\ ; \qquad (19)$$

– если $l_c = \frac{l_0}{n}$ – характерная длина балочного элемента и общая длина с учетом деформации равна $l - l_0 + \Delta$, то конечно–элементная аппроксимация местной деформации разрушения может быть представлена в виде выражения (20):

$$\varepsilon = ln\frac{n\left(l-\frac{(n-1)l_0}{n}\right)}{l_0} = ln\frac{(l-l_0)+l_c}{l_c} = ln\left(\frac{\Delta}{l_c}+1\right). \qquad (20)$$

Действительная деформация разрушения оценивается по соотношению (21):

$$\varepsilon_f = ln\frac{l}{l_0} = ln\left(\frac{\Delta}{l_0}+1\right). \qquad (21)$$

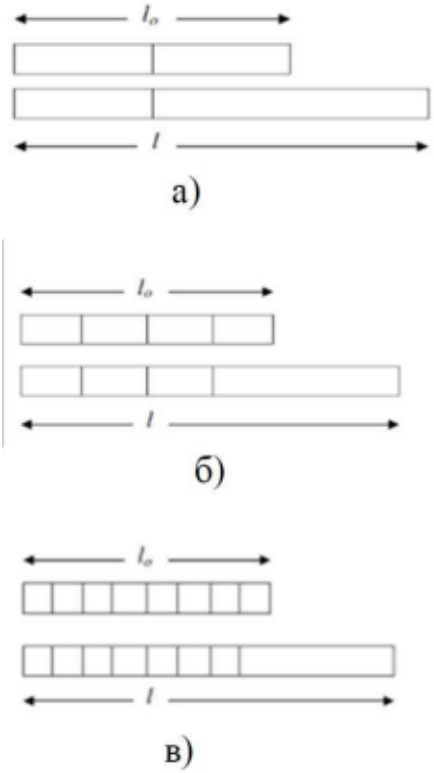


Рисунок 4. *– Сеточная зависимость деформации а) 2-х балочного элемента; б) 4-х балочного; в) n-элементной балки*

Figure 4. *The mesh dependency of deformation a) 2-beam element; b) 4-beam element; c) n-element beam*

В модели с конечными элементами размер элемента определяет как локализация деформации отражается на распределении напряжений. В случае слишком крупных элементов процесс локализации будет сглаживаться, что приведет к недооценке концентрации напряжений и, следовательно, завышению значений разрушения. Напротив, использование мелкой сетки приводит к

более точному описанию локализованной зоны, однако одновременно увеличивает вычислительные затраты и может вызвать численные артефакты, такие как сверхлокализация.

Для преодоления этой зависимости и получения адекватных результатов вводятся подходы, учитывающие размерную регуляризацию, например:

1) использование независимых от сетки критериев разрушения, таких как меры повреждения, зависящие от физической микроструктуры материала;

2) применение градиентных моделей пластичности, в которых деформационные переменные зависят не только от локального состояния, но и от пространственного распределения;

3) использование адаптивной сетки, оптимизирующей распределение конечных элементов в критических зонах.

Таким образом, уменьшение размера конечных элементов приводит к увеличению локальной деформации, при которой происходит разрушение. Это обусловлено повышенной концентрацией пластической деформации в зоне локализации, детализированной мелкой сеткой. В связи с этим верификация модели материала должна проводиться с учетом фактического размера конечных элементов, применяемых в расчетной модели, чтобы минимизировать погрешности, связанные с сеточной зависимостью.

В случае использования нерегулярной или неоднородной КЭ–сетки, возникает дополнительная необходимость построения обобщенной зависимости, учитывающей влияние размера конечных элементов на критерий разрушения. Такая зависимость представляет собой регуляризационную кривую**,** описывающую закономерности изменения параметров разрушения в зависимости от размеров элементов сетки (рис. 5).

В ходе ряда проведенных расчетов и дальнейшего сравнения с натурными испытаниями образцов легированной стали 30ХГСА при статических испытаниях на растяжения, можно получить зависимости расчетной вязкости образца (рис. 6).

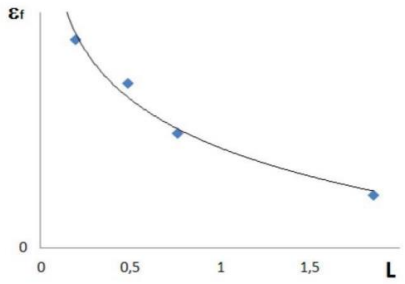


Рисунок 5. *Зависимость пластической деформации разрушения от характерного размера сетки (регуляризационная кривая)*

Figure 5. *The dependence of plastic failure strain on the characteristic mesh size (regularization curve)*

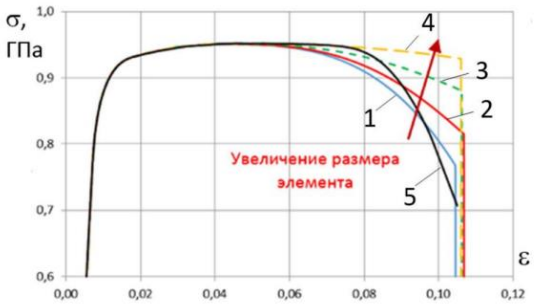


Рисунок 6. *Сеточная зависимость расчетной вязкости образца 1-4 – различные длины элемента, 5 – эксперимент*

Figure 6. *The mesh dependency of the calculated sample viscosity 1-4 – different element lengths; 5 – experiment*

Регуляризационная кривая позволяет:

1) снизить погрешности расчетов путем адаптации модели разрушения к специфике расчетной сетки;

2) улучшить переносимость модели между различными конфигурациями сетки, включая адаптивные схемы и многомасштабные подходы;

3) повысить достоверность результатов при моделировании локализованных процессов, таких как шейкообразование или трещинообразование.

Формирование такой кривой требует проведения серии численных экспериментов на типовых задачах с использованием конечных элементов различного размера. Для каждого размера сетки определяются ключевые параметры разрушения, такие как предельная деформация или критический уровень повреждений. Затем эти данные аппроксимируются функцией, обеспечивающей гладкое и физически обоснованное описание зависимости.

Таким образом, учет регуляризационной кривой в численных расчетах является ключевым этапом в разработке надежных и верифицированных моделей разрушения, обеспечивающих физическую обоснованность и адекватность прогнозирования поведения конструкций при предельных нагрузках. Таким образом, учет регуляризационной кривой в численных расчетах является ключевым этапом в разработке надежных и верифицированных моделей разрушения, обеспечивающих физическую обоснованность и адекватность прогнозирования поведения конструкций при предельных нагрузках.

Верификация модели материалов

Процедура верификации численной модели материала представляет собой серию калибровочных тестов для определения параметров модели на основе экспериментальных данных одноосного разрыва образцов. На начальном этапе в качестве основы может быть использована модель материала MAT_POWER_LAW_PLASTICITY, параметры которой были предварительно получены путем восстановления диаграммы деформирования методом Рамберга–Осгуда. Данный подход позволяет описать зависимость напряжения пластического течения от пластической деформации с учетом нелинейного поведения материала.

Для успешной верификации модели необходимо построить и проанализировать следующие зависимости:

1) кривую упрочнения материала, основанную на экспериментальных данных, полученных при испытаниях образцов на одноосное растяжение;

2) регуляризационную кривую, отражающую зависимость характеристик разрушения от размера конечных элементов расчетной сетки;

3) диаграммы поведения модели материала, соответствующие параметрам, характеризующим искажение вязкости образца в закритической области для различных плотностей конечных элементов расчетной сетки.

В процессе верификации проводится сравнение численных и экспериментальных данных для стандартных образцов, выполненных из стали 30ХГСА, подвергнутых статическим испытаниям на растяжение. Особое внимание уделяется сходимости расчетных значений с экспериментальными при варьировании плотности конечной элементной сетки. Для анализа использовались модели с характерным размером элементов: 2.5 мм, 1 мм и 0.5 мм.

Результаты анализа представлены на рисунках 7 и 8, где отображены диаграммы зависимости вязкости материала от размеров конечных элементов и согласование расчетных кривых с экспериментальными данными. Такой подход обеспечивает надежность и универсальность численной модели, применяемой для анализа прочности и разрушения конструкций.

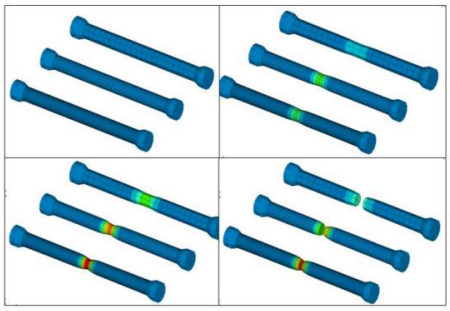


Рисунок 7. *Расчетное разрушение образцов*
Figure 7. *Computational fracture of samples*

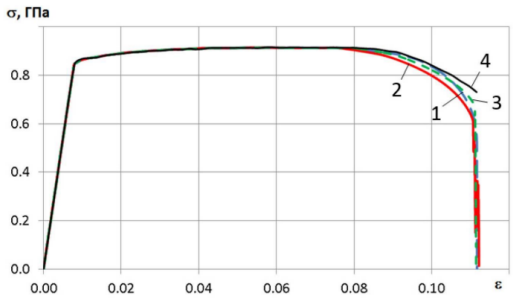


Рисунок 8. *Экспериментальная и расчетные зависимости 2.5 мм, 2 –1 мм, 3 – 0.5мм, 4 – эксперимент*
Figure 8. *The experimental and computational dependencies 1 – 2.5 mm; 2 – 1 mm; 3 – 0.5 mm; 4 – experiment*

В результате верификации модели достигнуты следующие цели:

1) подтверждение точности численной модели: величина расчетной вязкости материала должна совпадать с экспериментальными данными в пределах допустимой погрешности;

2) оценка влияния размера конечных элементов: должны быть установлены законо-

мерности изменения характеристик разрушения и вязкости материала в зависимости от плотности сетки;

3) построение обобщенных зависимостей: регуляризационная кривая должна быть дополнительно верифицирована для описания поведения материала в условиях локализованной пластической деформации.

Таким образом, верификация численной модели показала хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных на ключевых участках диаграммы деформирования. На этапах пропорциональности, нелинейной упругости, упругопластических деформаций, зоны текучести и зоны упрочнения наблюдается высокая согласованность результатов, что подтверждает корректность выбранных параметров модели материала.

Для элементов размером 2.5 мм максимальное расхождение в значениях диаграммы деформации составило 8.3%. Однако на участке закритических деформаций выявлены небольшие расхождения, обусловленные сложностью описания локализованных процессов разрушения, зависящих от плотности конечных элементов сетки.

Этот результат подчеркивает необходимость учета влияния размеров конечных элементов при моделировании закритического поведения материала. Построение регуляризационной зависимости позволяет повысить точность моделирования и учесть особенности разрушения на стадии локализованной пластической деформации.

Заключение

Изучение процессов деформирования и разрушения материалов является важнейшей задачей, особенно в контексте обеспечения безопасности и надежности конструкций атомной отрасли. Представленные методы моделирования упругопластических свойств и разрушения материалов, включая использование подходов аппроксимации Рамберга-Осгуда кривых деформирования и построение регуляризационных зависимостей, позволяют с высокой точностью описывать сложные механические процессы.

Верификация моделей материалов, выполненная с учетом влияния плотности конечных элементов сетки, продемонстрировала сходимость расчетных и экспериментальных данных на всех ключевых этапах деформации. Несмотря на небольшие расхождения в области закритических деформаций, предложенные методы позволили повысить точность описания локализованных процессов разрушения. Построение регуляризационных кривых обеспечивает адаптацию моделей к сеточным эффектам, что особенно актуально для инженерных расчетов

Важность этой работы для атомной отрасли заключается в том, что точное моделирование деформирования и разрушения материалов является неотъемлемой частью проектирования, оценки ресурса и диагностики состояния конструкций ядерных объектов. Корректное описание реологических свойств материалов, адаптированное к специфическим условиям эксплуатации, способствует повышению безопасности и долговечности ядерных установок, минимизируя риски аварийных ситуаций.

Таким образом, описанные методы и подходы обладают значительным потенциалом для внедрения в практику проектирования и эксплуатации конструкций в атомной отрасли, обеспечивая высокий уровень надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Морозов Е.М., Муйземнек А.В., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: механика разрушения. Москва: Москва: URSS, 2008. 453 с.Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01003413407 (дата обращения: 28.09.2024).

2. Жерноклетов М.В., Глушков Б.Л. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2005. 428 с. Режим доступа: http://book.sarov.ru/product/research-techniques-of-properties-of-materials/ (дата обращения: 28.09.2024).

3. Soden P.D., Kaddour A.S., Hinton M.J. Recommendations for designers and researchers resulting from the world-wide failure exercise. Failure criteria in fibre-reinforced-polymer composites. 2004. P. 1223–1251. https://doi.org/10.1016/B978-008044475-8/50039-1

4. Бетехтин В.И., Журков С.Н. Временная и температурная зависимость прочности твердых тел. *Проблемы прочности*. 1971;2:39–44. Режим доступа: http://unilibrary.ru/articles/journals/problemi-prochnosti/problemi-prochnosti-1971/problemi-prochnosti-1971-02/betehtin-vi-zhurkov-sn-vremennaja-i-temperaturnaja-zavisimost-prochnosti-tverdih-tel.html (дата обращения: 28.09.2024).

5. Огородников В.А., Пушков В.А., Тюпанова О.А. Основы физики прочности и механики разрушения. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. 338 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003414764/ (дата обращения: 28.09.2024).

6. Ахмадеев Н.Х. Исследование откольного разрушения при ударном деформировании. Модель повреждаемой среды. *Прикладная механика и техническая физика.* 1983;4:158–167. Режим доступа: https://www.sibran.ru/upload/iblock/f43/f43b38565aa7260831063f242cb3d3bb.pdf (дата обращения: 28.09.2024).

Akhmadeev N.H. Investigation of spall fracture during shock deformation. The model of the damaged environment. *Journal of applied mechanics and technical physics*. 1983;4:158–167. Available at: https://www.sibran.ru/upload/iblock/f43/f43b38565aa7260831063f242cb3d3bb.pdf (accessed: 28.09.2024).

7. Марковец М.П. Диаграммы истинных напряжений и расчет на прочность. Диссертация доктора технических наук. Москва: Издательствово Оборонгиза, 1947. 139 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_011185059/ (дата обращения: 28.09.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:
Балябин А.И. – проведение численных расчетов, подготовка текста статьи, постановка задачи, выбор методов исследования;
Герасимов С.И. – общее руководство исследованием, выбор методов исследования;
Ладин Д.А. – выбор методов исследования;
Маскайкин С.А. – подготовка и провидения опытов по разрыву образцов;
Шаброва Т.С. – подготовка текста статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Balyabin A.I. – conducting numerical calculations, preparing the article text, defining the problem, choosing research methods;
Ladin D.A. – choosing research methods;
Gerasimov S.I. – general supervision, selecting research methods;
Maskaykin S.A. – preparing and conducting sample rupture experiments;
Shabrova T.S. – preparing the article text.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00613

FUNDING:
This article was prepared with the support of grant RNF (project № 20-19-00613)

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:
No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Андрей Игоревич Балябин, инженер-исследователь, Российский федеральный ядерный центр, г. Саров, Российская Федерация.
https://orcid.org/0009-0007-9013-4932
e-mail: andrewbalyabin@yandex.ru
Сергей Иванович Герасимов, доктор физико-математических наук, начальник отдела, Российский федеральный ядерный центр, г. Саров, Российская Федерация, профессор, Саровский физико-технический институт.
https://orcid.org/0000-0002-6850-0816
WoS Researcher ID: L-8727-2016
e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru
Дмитрий Александрович Ладин, инженер, Российский федеральный ядерный центр, аспирант, Саровский физико-технический институт.
https://orcid.org/0009-0003-9667-1000
e-mail: ladind.a@yandex.ru
Сергей Александрович Маскайкин, главный инженер, Российский федеральный ядерный центр, г. Саров, Российская Федерация.
e-mail: maklay577@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Andrey I. Balyabin, research engineer, Russian Federal Nuclear Center, Sarov, Russian Federation.
https://orcid.org/0009-0007-9013-4932
e-mail: andrewbalyabin@yandex.ru

Sergey I. Gerasimov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Head of Department, Russian Federal Nuclear Center, Sarov, Russian Federation, professor, Sarov Physics and Technology Institute.
https://orcid.org/0000-0002-6850-0816
WoS Researcher ID: L-8727-2016
e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

Dmitry A. Ladin, engineer, Russian Federal Nuclear Center, Sarov, Russian Federation, postgraduate student, Sarov Physics and Technology Institute.
https://orcid.org/0009-0003-9667-1000
e-mail: ladind.a@yandex.ru
Sergey A. Maskaykin, Chief engineer, Russian Federal Nuclear Center, Sarov, Russian Federation.
e-mail: maklay577@yandex.ru

Дмитрий Юрьевич Смирнов, научный сотрудник, Российский федеральный ядерный центр, Саров, преподаватель, Саровский физико-технический институт.
https://orcid.org/0000-0001-5302-897X
e-mail: smirnovdj@yandex.ru
Татьяна Сергеевна Шаброва, инженер-исследователь, Российский федеральный ядерный центр, г. Саров, Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0002-3954-6639
e-mail: tshabro@mail.ru

Dmitry Y. Smirnov, scientific researcher, Russian Federal Nuclear Center, Sarov, Russian Federation, lecturer, Sarov Physics and Technology Institute.
https://orcid.org/0000-0001-5302-897X
e-mail: smirnovdj@yandex.ru
Tatyana S. Shabrova, Research engineer, Russian Federal Nuclear Center, Sarov, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0002-3954-6639
e-mail: tshabro@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 26.09.2024
После доработки / Revised 10.12.2024
Принята к публикации / Accepted 12.12.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5
https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06
EDN SAGHCF
Оригинальная статья / Original paper

Нейтронно-шумовые методы контроля активных зон ВВЭР

Г.В. Аркадов [1], М.Т. Слепов [2] ✉
[1] *Некоммерческое партнерство содействию развитию системной инженерии «Райз», г. Москва, Российская Федерация*
[2] *Филиал Акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация*
✉ *slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Аннотация. Многие исследовательские коллективы и группы уделяли значительное внимание вопросам шумового анализа и контроля параметров работы ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Это нашло отражение в научной среде в виде многочисленных публикаций, монографий, статей и обзоров, посвященных изучению шумовых составляющих различных вариативных сигналов реакторных установок (РУ). Однако, несмотря на передовые теоретические работы по этой теме, прикладные исследования, то есть прямые реакторные эксперименты, остались в стороне от интересов как отечественных, так и зарубежных ученых. Необходимость практических исследований обусловлена сложностью интерпретации разнообразных аномалий, выявляемых с помощью шумовых методов, а также необходимостью точной настройки различных моделей. Кроме того, спектральные образы оборудования могут значительно различаться не только между разными проектами РУ, но и внутри однотипных блоков на одной АЭС. Эти проблемы невозможно решить только с помощью теоретических или расчетных методов, а также с использованием имитационного моделирования. Ситуация усложняется тем, что проведение шумовых исследований представляет собой сложную задачу как по выбору источников шумовых данных, так и по интерпретации полученной информации. Вероятно, именно эти причины объясняют значительное снижение интереса к экспериментальным работам по шумовой тематике на различных РУ как в мировой практике, так и в России. В представленной статье в краткой форме рассмотрены некоторые возможности методов нейтронно-шумового контроля активных зон, направленных на повышение надежности и безопасности ЯЭУ. Кроме того, в статье обсуждаются пути снижения трудоемкости их использования для максимально раннего выявления аномального состояния различного оборудования.

Ключевые слова: нейтронный шум, датчик прямого заряда, акустическая стоячая волна, внутриреакторный контроль, спектральная плотность мощности, когерентность.

Для цитирования: Аркадов Г.В., Слепов М.Т. Нейтронно-шумовые методы контроля активных зон ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):55–70. https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06

For citation: Arkadov G. V., Slepov M. T. Neutron noise control techniques for VVER core. *Global nuclear safety.* 2024;14(4):55–70. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-06

Neutron noise control techniques for VVER core

Gennady V. Arkadov [1], Mikhail T. Slepov [2] ✉
[1] *Non-profit Partnership for the Promotion of System Engineering «Rise», Moscow, Russian Federation*
[2] *Novovoronezh Nuclear Plant the branch of JSC Russian Concern for Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation*
✉ *slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru*

Abstract. Many research staffs and groups have paid considerable attention to the issues of noise analysis and control of nuclear power plant operation parameters. This is reflected in the scientific environment in the form of numerous publications, monographs, articles, and reviews devoted to the study of noise components of various variation signals of

© Аркадов Г.В., Слепов М.Т., 2024

reactor plants. However, despite the advanced theoretical works on this topic, applied research, i.e. direct reactor experiments, remains aside from the interests of both local and foreign scientists. The need of practical research is due to the complexity of interpretation of a variety of anomalies detected by noise methods, as well as the need to fine-tune various models. In addition, the spectral images of equipment can differ significantly not only between different designs of reactor plants, but also within the same-type units at one NPP. These problems cannot be solved by theoretical or computational methods alone, or by using simulation modeling. The situation is complicated by the fact that noise studies are a complex task both in terms of selecting noise data sources and interpreting the obtained information. Probably, these reasons explain the significant decrease of interest to experimental works on noise subject at various reactor plants both in the world practice and in Russia. The paper briefly discusses some possibilities of methods of neutron-noise control of cores aimed at improving the reliability and safety of NPPs. In addition, the article considers ways to reduce the labor intensity of their use for the earliest possible detection of anomalous condition of various equipment.

Keywords: neutron noise, direct charge sensor, acoustic standing wave, in-reactor control, spectral power density, coherence.

Введение

В российской атомной энергетике активно применяются внутриреакторные измерения и используются расчетные коды для восстановления пространственно-зависимого поля энерговыделения в активной зоне. Это является основной задачей системы внутриреакторного контроля (СВРК). В реакторе ВВЭР-1200 из 163 тепловыделяющих сборок (ТВС), образующих активную зону, 54 оснащены сборкой внутриреакторных детекторов. В эту сборку входят семь датчиков прямого заряда, равномерно распределенных по высоте. Каждый датчик генерирует сигнал, пропорциональный нейтронному потоку, что в общей сложности составляет 378 отдельных каналов для измерения внутриреакторного нейтронного потока.

Токовый сигнал датчиков прямого заряда возникает в результате реакции взаимодействия нейтронов с нейтроночувствительным элементом детектора. В зависимости от типа ядерной реакции, процесс токообразования могут определять различные частицы: электроны, протоны, α-частицы и осколки деления. В настоящее время наибольшее практическое применение нашли датчики прямого заряда, в которых носителями тока являются электроны. Нейтронные датчики прямого заряда можно разделить на две категории: активационные и комптоновские.

Активационные датчики в основном используют β-частицы, образующиеся в нейтроночувствительном элементе (родий) при распаде β-активных нуклидов, которые возникают в результате взаимодействия с нейтронами. В комптоновских датчиках, напротив, применяются комптоновские и фотоэлектроны, которые образуются при взаимодействии с материалом эмиттера, испускающим γ-кванты в результате ядерной реакции [1].

Система внутриреакторного контроля использует постоянную составляющую токов активационных датчиков прямого заряда. Значения обновляются раз в секунду, что в большинстве случаев достаточно для контроля нейтронно-физических и теплогидравлических параметров активной зоны, а также для управления полем энерговыделения в переходных режимах [2]. Однако в токовых сигналах датчиков прямого заряда присутствует флуктуирующая (шумовая) составляющая, обусловленная комптоновским эффектом поглощения γ-квантов материалом эмиттера. Ее вклад в общую силу тока составляет примерно 1% [1] от общего уровня сигнала.

Несмотря на кажущуюся незначительность шумовой составляющей, анализ флуктуаций открывает новые возможности для контроля фактического состояния реакторной установки с ВВЭР. Это, в свою очередь, улучшает наблюдаемость активной зоны во время эксплуатации и повышает ядерную и радиационную безопасность энергоблока в целом.

Краткие сведения о цифровой обработке сигналов

Периодические сигналы можно разложить в ряд Фурье, который представляет собой сумму гармонических функций или комплексных экспонент с частотами, распо-

ложенными в арифметической прогрессии. Однако, существуют ограничения на такое разложение [3]. Для практических целей обычно выделяется временной интервал, для которого строится ряд Фурье, а в остальное время сигнал считается равным нулю. Сергиенко А.Б. [3] приводит синусно-косинусную форму разложения исходного сигнала в ряд Фурье, формула (1):

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \times \cos(k\omega_1 t) + b_k \times \times \sin(k\omega_1 t)). \quad (1)$$

В приведенном выражении $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ – круговая частота, соответствующая периоду повторения сигнала, равному T, связанная с частой f формулой $\omega = 2\pi f$. Коэффициенты a_k и b_k рассчитываются по формулам (2):

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(k\omega_1 t)\, dt; \quad b_k = \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(k\omega_1 t)\, dt. \quad (2)$$

Используя формулу (3) Эйлера [4,5]:

$$e^{jx} = \cos x + j \sin x, \quad (3)$$

получим суммы комплексных экспонент с положительными и отрицательными показателями, формула (4):

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k}{2} (e^{jk\omega_1 t + j\varphi_k} + e^{-jk\omega_1 - j\varphi_k}). \quad (4)$$

Пропуская ряд математических преобразований (подробный вывод см. в источниках [3,4]), можно перейти к комплексной форме ряда Фурье, формула (5):

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{-jk\omega_1 t}; \quad (5)$$

где коэффициенты C_k вычисляются по формуле (6):

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \times e^{-jk\omega_1 t}\, dt. \quad (6)$$

Все вышесказанное справедливо, прежде всего, для сигналов, которые повторяются через равные промежутки времени. Однако в реальности такие сигналы не являются периодическими.

Поэтому необходимо сделать несколько допущений, как это описано в источниках [3,4], чтобы перейти от формулы (6) к формуле прямого преобразования Фурье (7):

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \times e^{-j\omega t}\, dt. \quad (7)$$

В результате использования формулы (7) вместо нумерованных коэффициентов ряда Фурье C_k, рассчитывается новая величина $S(\omega)$ – спектральная функция сигнала $s(t)$, называемая спектральной плотностью. Таким образом, преобразование Фурье является инструментом спектрального анализа непериодических сигналов.

В дискретном представлении формула (7) принимает вид выражения (8), согласно Р.Б. Рандаллу [5]:

$$S(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \times e^{-j\frac{\omega nk}{N}}. \quad (8)$$

В исследовании Сергиенко А.Б. [3] было доказано, что спектральная плотность не предоставляет никакой информации о флуктуациях – то есть о случайной составляющей случайного процесса. Это означает, что фазы спектральных компонентов в различных реализациях процесса являются случайными и независимыми друг от друга.

Таким образом, более целесообразным вариантом является использование спектральной плотности мощности, так как она не зависит от соотношения фаз спектральных составляющих, формула (9):

$$W(\omega) = \lim_{T\to\infty} \frac{\overline{|S_T(\omega)|^2}}{T}. \quad (9)$$

Взаимный спектр $S_{AB}(\omega)$, двух различных процессов $S_A(\omega)$ и $S_B(\omega)$ определяется выражением (10):

$$S_{AB}(\omega) = S_A^*(\omega) \times S_B(\omega), \quad (10)$$

где $S_A^*(\omega)$ – комплексно-сопряженный спектр относительно $S_A(\omega)$.

Взаимный спектр позволяет рассчитать две фундаментальные величины, связывающие два процесса. Во-первых, функцию когерентности, характеризующую степень линейной зависимости между сигналами в частотной области, формула (11):

$$\gamma^2(\omega) = \frac{|S_{AB}(\omega)|^2}{S_{AA}(\omega) \times S_{BB}(\omega)}. \quad (11)$$

Функция когерентности является безразмерной величиной и может принимать значения от 0 до 1. Если $\gamma(\omega_i) = 1$, то два процесса на частоте ω_i связаны линейно, в случае

$\gamma(\omega_i) = 0$, процессы на частоте ω_i не связаны. Во-вторых, разность фаз между двумя процессами в частотной области. Для этого необходимо представить взаимный спектр в виде суммы вещественной $Re[S_{AB}(\omega)]$ и мнимой $Im[S_{AB}(\omega)]$ частей (рис. 1). Тогда по формуле (12) рассчитывается фаза в интервале $-2\pi; 2\pi$, характеризующая сдвиг колебаний на указанной частоте для двух процессов, формула (12):

$$\varphi(\omega) = arctg\frac{Im[S_{AB}(\omega)]}{Re[S_{AB}(\omega)]}, \quad (12)$$

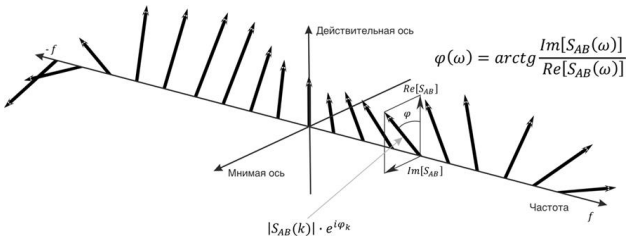


Рисунок 1. *Расчет разности фаз колебаний на основе взаимного спектра в комплексной форме*
Figure 1. *Calculation of oscillation phase difference based on mutual spectrum in complex form*

Для расчета спектров используется специальная вычислительная процедура – быстрое преобразование Фурье (БПФ), по сравнению с непосредственным вычислением по формуле (8) отличается существенным уменьшенным числом операций вычисления, более подробно алгоритмы и методы использования БПФ описаны в работах Сергиенко А.Б. [3], Лайонса Р. [4], Рандалла Р.Б. [5].

В условиях вибрационных нагрузок состояние оборудования нельзя оценивать, основываясь только на критериях циклической прочности и виброизноса. Даже если эти критерии выполняются, аномальное состояние может наступить при частичном или полном нарушении прочности и целостности оборудования.

Для оценки вибрационных воздействий на внутрикорпусное оборудование (шахту внутрикорпусную) и сам корпус реактора необходимо установить строгие нормативные значения измеряемых параметров вибрации в виде максимальных пороговых величин, аналогично тому, как это делается для роторных машин. Наиболее эффективным подходом к определению граничных значений уровней вибрации внутрикорпусных устройств и корпуса реактора является экспериментальный – проведение большого количества измерений вибрации в различных режимах эксплуатации реактора.

Этот подход успешно применяется в атомной энергетике Германии, где вибрационные нормы были установлены на уровне национальных стандартов еще в 90-е гг. XX века. К сожалению, в России нормативная база значительно отстает от этого уровня.

Глобальный нейтронно-шумовой эксперимент

В конструкции активной зоны реактора ВВЭР-1200 были произведены значительные изменения. Высота топливной колонны стала больше, а диаметр топливной композиции – шире. В то же время диаметр центрального отверстия был уменьшен, что привело к увеличению общей массы топлива. Кроме того, был изменен регламент управления системой управления и защиты (СУЗ). Количество управляющих групп возросло, а глубина погружения отдельных органов управления уменьшилась. ТВС также претерпели изменения. Была добавлена антивибрационная нижняя решетка и перемешивающие элементы в верхней части. В активной зоне реактора ВВЭР-1200 более высокое давление в первом контуре и увеличенный расход теплоносителя по сравнению с реактором ВВЭР-1000.

Учитывая все эти факторы, необходимо провести исследование активной зоны реактора ВВЭР-1200 в условиях эксплуатации, опираясь на опыт нейтронно-шумовой диагностики реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Для энергоблоков ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 уже накоплена экспериментальная база по нейтронно-шумовым измерениям как в России, так и за рубежом. Однако энергоблок ВВЭР-1200 представляет собой новый объект для исследования. Следует отметить, что в проекте ВВЭР-1200 есть ТВС, в которых органы регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) и каналы нейтронных измерений (КНИ) ДПЗ совмещены в одной сборке. Это позволяет непосредственно из-

мерять токи ДПЗ в зависимости от положения ОР СУЗ [2,6].

Для получения необходимой информации был проведен уникальный эксперимент с регистрацией нейтронных шумов по всевозможным комбинациям коммутации ДПЗ. Для получения спектральных оценок нейтронного потока в активной зоне была использована мобильная измерительная система модульного типа, которая позволяла непрерывно записывать сигналы в течение 1800 секунд с частотой дискретизации 1024 Гц без подключения к компьютеру. Это обеспечивало полностью автономный цикл работы.

Штатная организация эксперимента предусматривала подключение мобильной системы к проектным каналам системы контроля вибрации (СКВ). При этом сама система не отключалась и использовалась в рабочем режиме. В одной многоканальной экспериментальной записи содержится 14 токовых сигналов от двух разных сборок КНИ, три сигнала от внешних ионизационных камер и до 12 сигналов от акселерометров. Технические средства и методика проведения измерений подробно описаны в работах Павелко В.И. и др. [7] и Федорова А.И. и др. [8].

Существуют определенные ограничения на коммутацию сборок КНИ. Например, для сохранения контроля за состоянием активной зоны с помощью КНИ проектант разделил 54 сборки на две группы по 27 штук. Каждая группа имеет свои кабельные трассы, аппаратуру обработки и помещения. Это позволяет сохранить половину сборок КНИ для наблюдения за активной зоной в случае различных аварий на атомной электростанции. Для подключения сборок КНИ можно использовать только выделенные группы, где один КНИ должен быть из первой группы, а другой – из второй. При этом можно менять порядок сборок внутри группы.

На рисунке 2 схематично показаны варианты коммутации сборок для одной сборки с координатами 12-27. Всего существует 27 вариантов коммутации. Группы КНИ показаны разными цветами для наглядности.

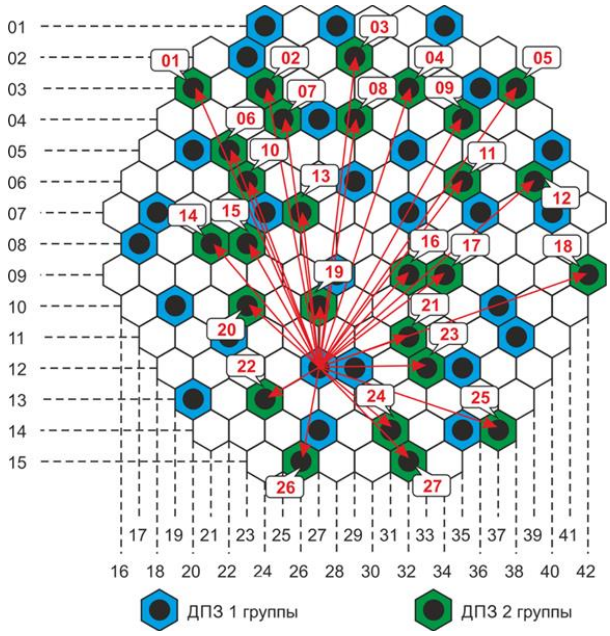


Рисунок 2. *Полный перебор пар ДПЗ для ТВС 12-27*
Figure 2. *Complete overshoot of direct charge sensor pairs for fuel assemblies 12-27*

Если менять первый КНИ из первой группы на следующий и перебирать вторую группу КНИ в той же последовательности, что и в предыдущем случае, то можно получить еще 27 многоканальных записей сигналов ДПЗ. Таким образом, можно получить 27 х 27 = 729 многоканальных записей. Каждая запись длится 30 минут, что дает общее время регистрации 364,5 часа. Процедура перекоммутации сборок КНИ представляет собой программный диалог между СКВ и системой внутриреакторной шумовой диагностики (ВРШД), что занимает сопоставимое время.

Таким образом, удалось получить уникальные многоканальные измерения флюктуаций нейтронного поля с полным перебором детекторов ионизационных камер. Нейтронно-шумовой эксперимент с перебором 729 пар КНИ претендует на обеспечение полноты наблюдаемости активной зоны.

Локализация кипения теплоносителя по высоте ТВС

Семь сигналов, полученные от одного КНИ, позволяют составить 21 комбинацию функций когерентности между ДПЗ данного КНИ. Это дает нам возможность исследовать все возможные пары сигналов, расположенные на разных уровнях ТВС.

В идеальном цилиндрическом реакторе, где теплофизические свойства теплоносителя остаются неизменными, функции когерентности, рассчитанные для одинаковых расстояний между двумя детекторами нейтронного потока (ДПЗ), должны быть идентичными.

Однако в реальных условиях, когда плотность теплоносителя уменьшается с увеличением аксиальной координаты и изменяется его агрегатное состояние, функции когерентности внутри одного семейства могут отличаться. Это можно наблюдать на примере ТВС с координатами 10-19, как показано на рисунке 3.

Все функции когерентности обладают общими свойствами:

– резонанс первой корпусной акустической стоячей волны ($АСВ_{1К}$) вблизи частоты 8,75 Гц (подробнее об условиях возникновения и свойствах различных АСВ можно прочитать в источниках [9,10]);

– минимум в диапазоне частот от 1,2 до 1,6 Гц;

– минимум в диапазоне частот от 7,48 до 7,52 Гц.

Акустическая стоячая волна $АСВ_{1К}$ с частотой 8,75 Гц представляет собой глобальный барометрический эффект, который чувствителен к среднему значению паросодержания в активной зоне и наблюдается во всех спектральных оценках сигналов ДПЗ, что делает ее глобальным явлением. Так, например, резонанс $АСВ_{1К}$ можно увидеть во всех оценках функции когерентности (рис. 3), которые были получены из одной многоканальной записи сигналов с семи датчиков положения в одном канале исследования.

Несмотря на свою глобальность, резонанс $АСВ_{1К}$ имеет некоторую закономерную изменчивость. Разные пары ДПЗ дают разные параметры резонанса $АСВ_{1К}$ (амплитуду, центральную частоту и добротность), хотя паровая фаза в среднем за время регистрации процессов оставалась неизменной. Амплитуда резонанса колеблется в широком диапазоне значений от 0,23 до 0,81, а частота, наоборот, в очень узком диапазоне от 8,72 Гц до 8,75 Гц.

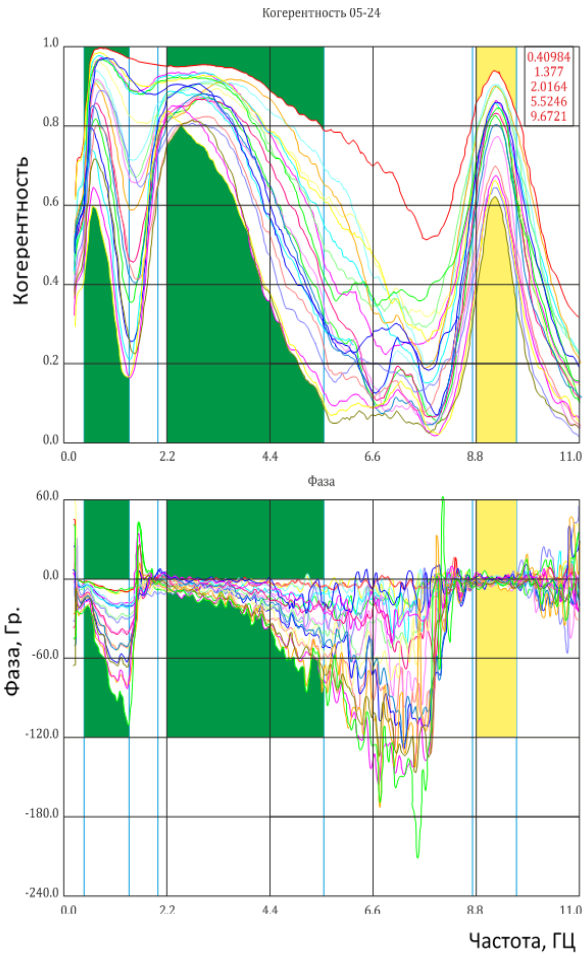


Рисунок 3. *Семейства функций когерентности (верхний график) и фаз (нижний график) всевозможных пар сигналов ДПЗ одного КНИ для ТВС с координатами 05-24*

Figure 3. *Families of coherence functions (upper graph) and phases (lower graph) of all possible pairs of signals of direct charge sensors of one neutron measurement channel for fuel assemblies with coordinates 05-24*

Параметры резонанса $АСВ_{1К}$ связаны с некоторой усредненной величиной паровой фракцией теплоносителя (ТН) из-за пространственной глобальности $АСВ_{1К}$. При увеличении объемной доли пара частота, амплитуда и добротность резонанса должны уменьшаться. В этом случае одна и та же паровая фракция ТН «рассматривается» различными парами датчиков под разными углами. Высокая амплитуда резонанса $АСВ_{1К}$ наблюдается для двух ДПЗ, расположенных в однофазном ТН. Например, для сигналов соседних ДПЗ (ДПЗ1-ДПЗ2, ДПЗ2-ДПЗ3, ДПЗ3-ДПЗ4) когерентность на частоте $АСВ_{1К}$ оказывается высокой. Для удаленных ДПЗ1-ДПЗ7 амплитуда меньше. Она также

низкая для когерентностей, в которых участвует сигнал серединного ДПЗ4.

АСВ$_{1К}$ представляет собой мощный осциллятор давления, который воздействует на весь объем теплоносителя (ТН) в активной зоне с частотой 8,75 Гц. Периодическое изменение давления, вызванное воздействием акустической стоячей волны (АСВ$_{1К}$), приводит к периодическому изменению объема пара в активной зоне. Это, в свою очередь, вызывает периодическое колебание нейтронного потока на указанной частоте вблизи датчика прямого заряда ДПЗ4. Важно отметить, что сигналы двух датчиков давления, расположенных в разных средах, коррелируют только по одноименной составляющей фракции ТН. Например, на уровне ДПЗ7 присутствует как паровая, так и водяная фракции. Поэтому корреляция сигналов ДПЗ1-ДПЗ7 происходит только по водяной фазе, что значительно снижает амплитуду резонанса АСВ$_{1К}$. Поэтому, чем меньше амплитуда резонанса функции когерентности сигналов ДПЗ1-ДПЗ7, тем больше доля паровой фазы по сравнению с долей водяной фазы. По этим критериям можно определить некоторые эмпирические диагностические признаки на качественном уровне.

Однако для более точной оценки стадии кипения и локализации по высоте лучше рассматривать функцию когерентности соседних по высоте ТВС датчиков прямого заряда. На рисунке 4 показаны функции когерентности для пар ДПЗ одной сборки с координатами 08-17. На уровнях ДПЗ 1, 2 и 3 функции когерентности пар ДПЗ1-ДПЗ2 и ДПЗ2-ДПЗ3 имеют ярко выраженную sink-структуру[1] в диапазоне от 4,5 Гц до 7,5 Гц, что следует интерпретировать как глобальное зашумление и ярко выраженный пик АСВ$_{1К}$ (8,75 Гц). На уровне ДПЗ2 происходит максимальное выделение энергии для всех ТВС. Поэтому, по крайней мере, начальные стадии пузырькового кипения уже присутствуют в этом уровне. Однако однофазный теплоноситель на уровне ДПЗ1 с начальными стадиями недогретого[2] кипения на уровнях ДПЗ2 и ДПЗ3 обеспечивает высокие корреляции по жидкому компоненту (когерентность примерно 0,6 как для sink-структуры, так и для АСВ$_{1К}$).

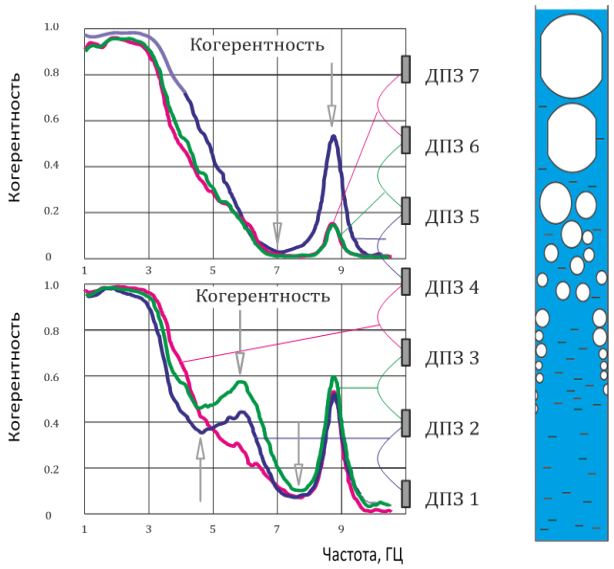


Рисунок 4. *Упрощенное изображение двухфазного ТН в одной ТВС 08-17 и расположение двух ДПЗ, сигналы которых обладают высокой и низкой когерентностью*

Figure 4. *Simplified image of a two-phase coolant in a single fuel assembly 08-17 and the location of two direct charge sensors whose signals have high and low coherence*

Начиная с пар ДПЗ3 и ДПЗ4 и далее (ДПЗ4 – ДПЗ5, ДПЗ5 – ДПЗ6, ДПЗ6 – ДПЗ7), можно заметить исчезновение так называемой sink-структуры и монотонное снижение когерентности вплоть до частоты 7,5 Гц. Это свидетельствует о том, что корреляции выше среднего уровня (уровня ДПЗ4) связаны с паровой фракцией теплоносителя. Особенно наглядно снижение амплитуды резонанса на частоте АСВ$_{1К}$ в парах ДПЗ5 – ДПЗ6 и ДПЗ6 – ДПЗ7. Это позволяет сделать вывод о стадии кипения, сопровождающейся образова-

[1] Последовательность периодических экстремумов – максимумов и минимумов – спектральных функций, функции когерентности, возникающую из-за тригонометрических сомножителей или слагаемых типа $sin(\omega\tau_0)$, $cos(\omega\tau_0)$, $sin\frac{\omega\tau_0}{2}$, $cos\frac{\omega\tau_0}{2}$, $sin\frac{(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$, $cos\frac{(\omega\tau_0)}{\omega\tau_0}$ и т.д., подробнее в источниках [6,9,11].

[2] Под термином «недогретое кипение» авторы подразумевают тип кипения, который имеет место, когда жидкость с температурой ниже температуры насыщения приходит в контакт с поверхностью нагревателя достаточно горячей, чтобы вызвать кипение. При этом, попав в область холодной жидкости, паровые пузырьки конденсируются, и не происходит результирующего отвода (накопления) паровой фазы в объем жидкости или ядро потока.

нием пузырьков и увеличением паровой фракции. Резонанс на частоте $АСВ_{1К}$, как было описано выше, обусловлен барометрическим эффектом реактивности, то есть колебаниями нейтронного потока, вызванными изменениями давления в жидкой фазе теплоносителя. Поэтому с уменьшением доли жидкой фазы и увеличением паровой замедляющая способность теплоносителя снижается, что, в свою очередь, влияет на амплитуду пика на частоте $АСВ_{1К}$.

Таким образом, анализируя изменения двух характеристик – sink-структуры в диапазоне от 4,5 Гц до 7,5 Гц и значения максимума на частоте $АСВ_{1К}$ – в функциях когерентности между ДПЗ одной ТВС, можно с определенной степенью достоверности судить не только о стадии кипения теплоносителя, но и о локализации этих стадий по высоте ТВС.

Оценка надежности фиксации ТВС в АЗ

Спектральная оценка каждого ДПЗ уникальна и неповторима, так как теплофизическое состояние теплоносителя в АЗ всегда различается как по радиусу, так и высоте. Однако, несмотря на разнообразие сигналов, можно выделить общие характеристики, которые свойственны большинству ДПЗ на одном горизонте.

Серия измерений, проведенных для горизонта ДПЗ1 разных ТВС показала, что на частоте 6,14 Гц в спектральных плотностях мощности (СПМ) наблюдается резонанс (рис. 5). Исключение составляют ДПЗ1, которые имеют собственное зашумление в этом диапазоне частот. Резонанс отличается высокой добротностью, и его частота точно повторяется от одной СПМ ДПЗ1 к другой. В некоторых СПМ ДПЗ1 также наблюдается вторая гармоника с частотой 12,28 Гц и даже субгармоника 5/2 – 15,40 Гц.

В горизонтальной плоскости на уровне ДПЗ1 наблюдается глобальное явление на частоте 6,14 Гц. В вертикальной плоскости оно не распространяется за пределы горизонта защитного ДПЗ2, т.к. лишь в редких случаях это явление может быть зафиксировано на уровне ДПЗ2 в небольшом количестве ТВС. Анализируемый эффект можно уверенно отнести к вибрационному по нескольким характерным признакам: высокая добротность резонанса, наличие гармоник и субгармоник, пространственное распределение, зависящее от расхода теплоносителя (по диаметру АЗ), и групповые фазовые соотношения, указывающие на коллективные маятниковые колебания ТВС.

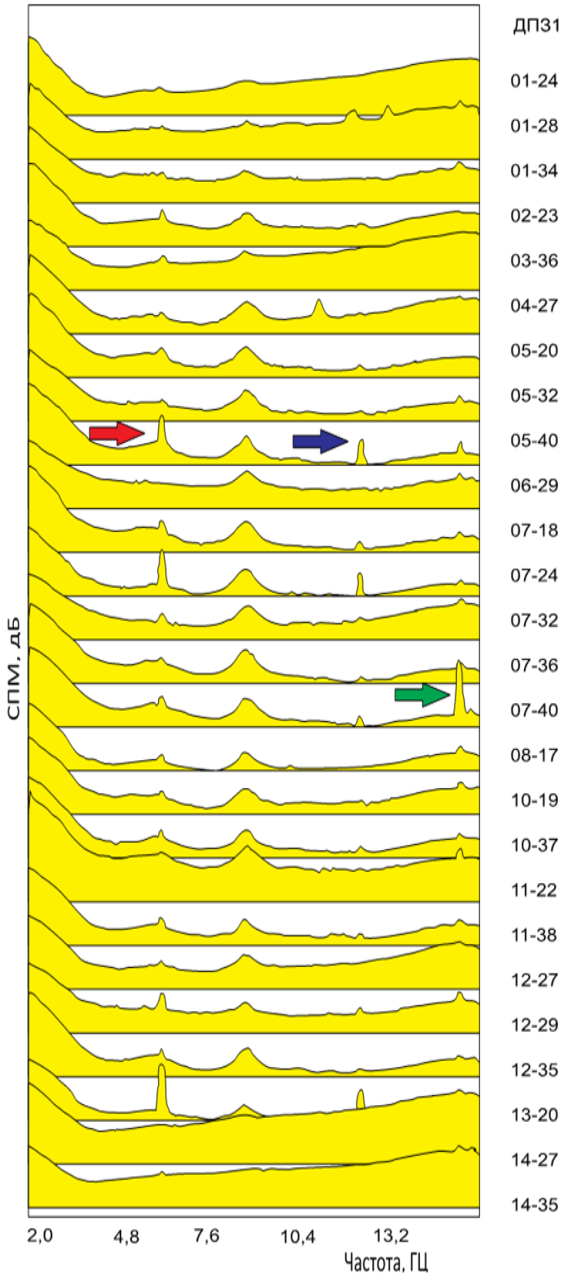


Рисунок 5. *СПМ сигналов ДПЗ1. Стрелками обозначены гармоники и субгармоники резонанса 6,14 Гц. Справа – номера ТВС*

Figure 5. *Power spectral density of signals of direct charge sensors1. The arrows indicate harmonics and subharmonics of the 6.14 Hz resonance. The numbers of fuel assemblies are on the right*

Согласно пояснительной записке[3] и источникам [12,13], частота 6,14 Гц соотносится с первой изгибной формой колебаний ТВС, представляющей собой колебания балки с двумя закрепленными концами. Отсутствие существенных различий в частоте колебаний (с точностью не менее 0,01 Гц[4]) для всех ТВС, независимо от их возраста, свидетельствует о том, что условия закрепления (степень поджатия пружин) остаются неизменными, что означает надежную фиксацию ТВС в активной зоне (АЗ).

В работе [14] представлены экспериментальные данные об изменении собственной частоты колебаний ТВС в зависимости от степени поджатия пружин. При уменьшении степени поджатия собственная частота колебаний ТВС снижается, достигая значений вплоть до 3,9 Гц (данные для воды при температуре 30 °С).

Таким образом, наличие резонанса на частоте 6,14 Гц в спектральных характеристиках токовых сигналов ДПЗ на горизонте 1 свидетельствует о нормальном (штатном) поджатии ТВС. Отклонение в сторону более низких значений указывает на ослабление или недостаточную степень поджатия.

Все это открывает путь к созданию эффективного и надежного метода диагностирования степени прижима тепловыделяющих сборок в процессе работы энергоблока. Этот метод, недоступный ранее, не требует установки дополнительного оборудования и может быть реализован исключительно на основе расчетов.

Возникает вопрос о причинах отсутствия резонанса с частотой 6,14 Гц на ДПЗ, расположенных выше горизонтов 1 или 2. Вероятно, это связано с глобальным шумом, который делает резонанс неразличимым. Однако в некоторых режимах на горизонтах 3 или 4 регистрируются колебания с частотой 12,28 Гц, что соответствует второй гармонике частоты 6,14 Гц, что в свою очередь позволяет сделать вывод о зашумлении диапазона частот, в которых возможна регистрация первой гармоники.

Необходимо отметить, что резонанс на частоте 6,14 Гц в настоящее время наблюдается только в нейтронно-шумовых сигналах датчиков прямого заряда для реакторов с ВВЭР-1200. Для реакторов с ВВЭР-1000 такой эффект не был обнаружен. Однако это не означает, что вибрационное состояние тепловыделяющих сборок в реакторах разных типов существенно различается. Скорее всего, этот эффект связан с несовершенством методики измерений, используемой на реакторах с ВВЭР-1000. Ожидается, что при использовании современных аппаратных средств и методики «тонких» измерений, разработанной авторами (подробнее в [7,8]), этот эффект будет обнаружен и на реакторах с ВВЭР-1000.

Анализ нейтронно-шумовой составляющей ДПЗ на маневренных режимах

Для проведения качественного анализа шумовых сигналов необходимо было соблюдать определенные принципы их регистрации. Одним из ключевых принципов было использование стабильных режимов работы оборудования. Указанное ограничение было связано с низкой разрядностью и тактовой частотой аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Из-за этого любые отклонения от стационарных режимов работы оборудования или изменения в процессе работы приводили к значительным искажениям в спектральных оценках, что затрудняло работу и искажало результаты. Долгое время такой подход к анализу шума устраивал разработчиков измерительных систем и персонал атомных электростанций (АЭС), которые использовали эти системы на энергоблоках. Это было обусловлено тем, что энергоблоки отечественных АЭС были предназначены для базовой нагрузки без учета суточных колебаний мощности в энергосистеме.

Ситуация изменилась с вводом в эксплуатацию энергоблоков ВВЭР-1200, которые

[3] Пояснительная записка. Сборка тепловыделяющая ядерного реактора, Нововоронежская АЭС-2, 2006.В.132.&.0UJA&&.JKA&&.021.СА.0006 392М.06.16.01 ПЗ, ОКБ «Гидропресс», 2009., 102 с.

[4] Указанная точность измерений обоснована одним из авторов в рамках подготовки к защите диссертации и ввиду большого объема не может быть представлена в данной работе. Однако при необходимости, авторы готовы предоставить указанную информацию при обращении на их электронные адреса

изначально были предназначены для суточного регулирования мощности. Поэтому возникла необходимость измерений шумовой составляющей вариативных сигналов в переходных режимах работы.

Авторы разработали методику и успешно провели серию шумовых измерений в маневренных режимах работы энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 в сентябре 2022 года. Длительность регистрации составила несколько часов.

В статье рассматривается запись, длительностью 400 минут. Начало записи соответствует моменту, когда энергоблок достиг 77 % стационарного состояния, а конец – 96 % стационарного состояния. Более подробно об этом можно узнать из работ [15,16].

В виду ограниченного объема статьи авторы ограничатся анализом только одной пары сборок с координатами 04-29 и 04-27. Важно отметить, что КНИ 04-29 установлена в тепловыделяющей сборке, где перемещается орган регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) 12 группы, а КНИ 04-27 находится в соседней тепловыделяющей сборке (ТВС). Для получения спектральных оценок сигналов, исходные процессы были подвергнуты цифровой фильтрации и разреживанию. Верхняя частота была установлена на уровне 32 или 16 Гц в соответствии с рекомендациями из [6].

При перемещении ОР СУЗ регистрировались наблюдаются δ-образные возмущения нейтронного, значительно превышающие фоновые значения как в сигналах внешних ионизационных камер (ИК), так и в сигналах внутризонных ДПЗ (см. рис. 6). ДПЗ с номерами 7, 6, 5, 4 одновременно реагируют на перемещение органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). Это свидетельствует о том, что причиной данных возмущений является общий фактор. Амплитуда одного из выбросов может превышать среднеквадратичное значение (СКЗ) фона в десятки раз, что существенно увеличивает мощность и вариативность процесса.

ОР СУЗ из 12-й группы расположены в той же ТВС, что и КНИ с координатами 04-29. Это означает, что расстояние между поглощающими стержнями (ПС) СУЗ и ДПЗ7 составляет всего несколько сантиметров. В каждой ТВС имеется 18 направляющих каналов, предназначенных для перемещения ОР СУЗ. Эти каналы расположены симметрично относительно вертикальной оси симметрии ТВС и равномерно распределены по ее поперечному сечению. Измерительный канал КНИ немного смещен относительно вертикальной оси симметрии ТВС. В непосредственной близости от него, на расстоянии нескольких сантиметров, находятся четыре ПС СУЗ. Любое их перемещение вызывает локальное возмущение нейтронного поля, которое регистрируется ближайшими ДПЗ.

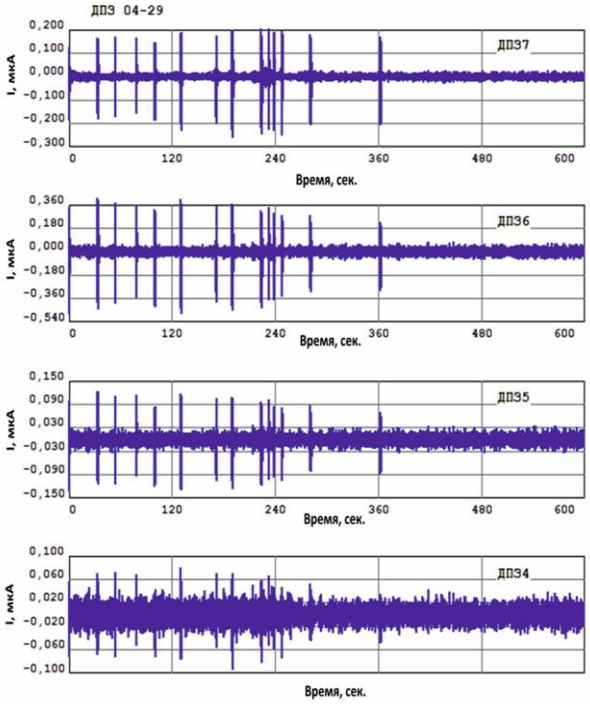


Рисунок 6. *Реализации шумов верхних ДПЗ (ДПЗ7,6,5,4 – сверху – вниз) в ТВС 04-29 с ОР СУЗ 12 группы на уровне мощности 77 % в течение 10 мин*
Figure 6. *Realizations of noise of upper direct charge sensors (direct charge sensors 7,6,5,4 - from top to bottom) in TVS 04-29 with control rods of group 12 at power level 77 % during 10 min*

Для анализа спектральной характеристик сигналов ДПЗ был выбран временной интервал длительностью 10 минут. Это означает, что на протяжении всей реализации, которая составляет 400 минут, было получено 40 спектров плотности мощности (СПМ). Эти спектры представлены в виде трехмерного «водопада» на рисунке 7.

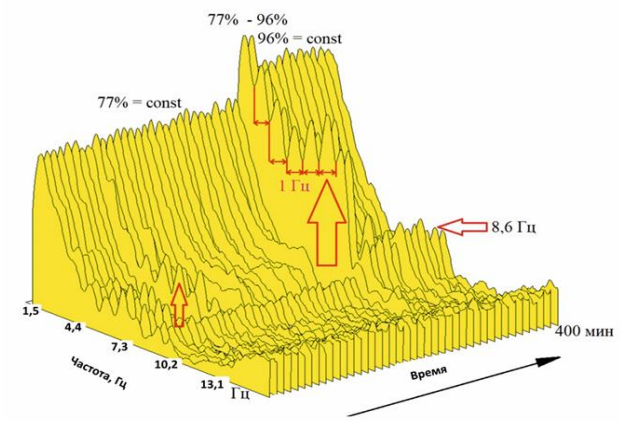


Рисунок 7. *Водопад спектров СПМ в логарифмическом масштабе для сигнала ДП36 в течение всего времени измерений*
Figure 7. *Falls of power spectral density spectra in logarithmic scale for the direct charge sensors 6 signal during the whole measurement time*

На каждом десятиминутном интервале наблюдается различное количество δ-образных возмущений. Однако в любом случае они формируют характерный спектр, напоминающий «гребенку». Например, при стационарном уровне мощности в 77 %, средняя интенсивность перемещений 12 группы ОР СУЗ составляет примерно один шаг в минуту. Эти перемещения создают импульсную нестационарность. В процессе увеличения мощности РУ с 77 % до 9 6% за 6,5 минут ОР СУЗ совершил 31 перемещение. Из них 14 были с двойным шагом, а 17 – с одинарным. Всего было 45 одинарных шагов, что составляет около семи шагов в минуту. Каждая из сорока СПМ на рисунке 7 имеет свой уникальный вид.

Не имеет значения, в какой части реализации произошло δ-образное возмущение и сколько их было. После спектрального преобразования мы получаем гармонический ряд частотных максимумов. Единственный шаг ОР СУЗ (или выброс) на интервале времени оценивания СПМ в 10 минут лишь незначительно увеличивает общую дисперсию сигнала, а структура, напоминающая «гребенку», находится на уровне собственного нейтронного фона [17,18,19].

Однако когда начинают двигаться вместе 11 и 12 группы ОР СУЗ, в СПМ сигнала ДПЗ появляется характерная структура, напоминающая «гребенку» (см. рис. 7, красная вертикальная стрелка).

Частота дискретизации СВРК при регистрации сигналов, ограниченна 1 Гц, не позволяет фиксировать высокочастотные возмущения нейтронного поля, вызванные перемещением ОР СУЗ. Поэтому при исследовании маневренных режимов целесообразно использовать дополнительно высокочастотную запись нейтронных шумов.

Так, например, если рассмотреть форму δ-образных возмущений во временной области (см. рис. 5), можно увидеть, что они длятся ровно 1 секунду и состоят из высокочастотных компонентов, где многократно повторяется элементарный шаг длительностью 0,125 секунды, что соответствует частоте 8 Гц. Это свидетельствует о высокочастотном полигармоническом возмущении нейтронного поля (рис. 8). Теперь можно определить числовые параметры этой гребенчатой структуры. Спектральная характеристика шума ДПЗ или ИК имеет вид гребенки с шагом по частоте, равным 1 Гц, и эти гармоники достигают как минимум частоты 8 Гц (рис. 8).

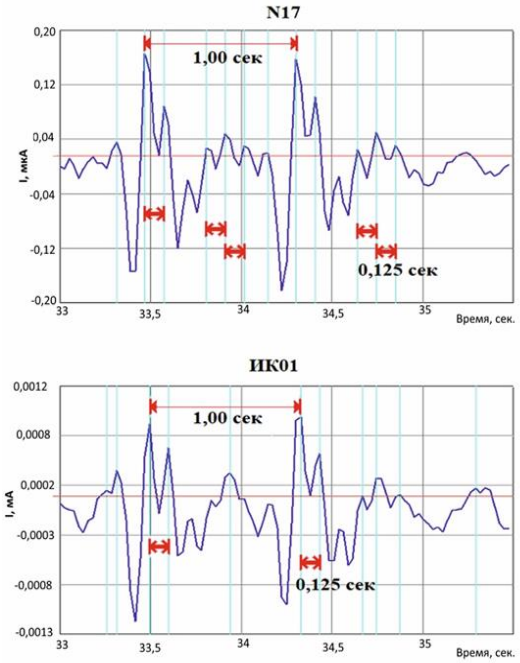


Рисунок 8. *Двойной шаг ОР СУЗ длительностью две секунды (периодическое возмущение) в сигнале ДП37 (верхний график) и ИК (нижний график)*
Figure 8. *Double step of the control rods of two seconds duration (periodic perturbation) in the direct charge sensors 7 signal (upper graph) and ionization chamber (lower graph)*

Нейтронные шумы можно разделить на два типа: глобальные и локальные. Глобальные шумы не зависят от местоположения и описываются точечной нейтронной кинетикой. Они характерны для низкочастотных составляющих, например, с периодом менее 1 секунды. Перемещения органов регулирования системы управления и защиты вызывают глобальные возмущения нейтронного поля. Эти возмущения регистрируются удаленными нейтронными датчиками. Например, формы сигналов, полученных от удаленных датчиков положения (ДПЗ7) и интенсивности (ИК), идентичны. В функции когерентности сигналов ИК1 и ИК2, которые также удалены друг от друга, наблюдается тот же гребенчатый вид с шагом 1 Гц.

Эксперимент показал, что многократное высокочастотное возмущение нейтронного поля с достаточной амплитудой, вызванное ОР СУЗ, также может иметь глобальный характер (подробнее [20]). Регулирующие группы ОР СУЗ представляют собой не только «тяжелые» по вносимой реактивности органы управления, но и довольно высокочастотные. Их перемещения можно сравнить с высокочастотными гармоническими воздействиями, которые изменяют энерговыделение по всему объему активной зоны.

При обосновании маневренных режимов необходимо учитывать количество циклов воздействия с частотой до 8 Гц. Вблизи частоты 8 Гц находится глобальная первая корпусная акустическая волна ($АСВ_{1К}$), которая охватывает всю активную зону и модулирует плотность теплоносителя, а значит, и нейронный поток [21,22]. Изменения в нейтронном поле, вызванные перемещением органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) со скоростью не более двух сантиметров в секунду, вызывают колебания, которые вступают в резонанс с барометрическим эффектом от воздействия $АСВ_{1К}$.

Если ОР СУЗ перемещается слишком часто, это может привести к монотонному увеличению дисперсии нейтронного потока из-за резонанса на частоте $АСВ_{1К}$. Для сравнения амплитуды сигналов различных ДПЗ, на рисунке 9 показаны их реализации, «склеенные» во времени.

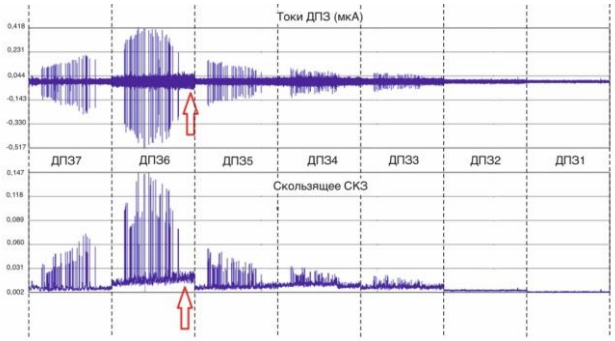


Рисунок 9. *«Склеенные» один за другим во времени реализации семи ДПЗ (ДПЗ7, …, ДПЗ1 – слева – направо) при переходе мощности РУ с 77 до 96 % за 6,5 мин каждая (верхний график). Их скользящие СКЗ (нижний график)*

Figure 9. *«Glued» one after another in time realizations of seven direct charge sensors (direct charge sensors 7, …, direct charge sensors 1 – from left to right) during the power transition from 77 to 96 % in 6.5 min each (upper graph). Their sliding RMS are in the bottom graph*

Можно увидеть, что максимальные выбросы наблюдаются на уровне ДПЗ6. Перемещение любой из регулирующих групп ОР СУЗ вызывает глобальные возмущения нейтронного поля. Помимо выбросов амплитуды нейтронного потока, вызванных перемещением ОР СУЗ, наблюдаются и другие нестационарные явления. Например, медленный рост среднеквадратичного значения (СКЗ) фона во времени при многократных шагах ОР СУЗ. На этих графиках СКЗ нейтронного фона значительно меньше амплитуды единичного выброса, но при многократных шагах ОР СУЗ в течение кампании СКЗ может достигать недопустимо больших значений.

Мощность АСВ определяется амплитудами пульсаций давления, создаваемыми четырьмя главными циркуляционными насосными агрегатами (ГЦНА). При изменении мощности реактора режим работы ГЦН остается неизменным, то есть параметры $АСВ_{1К}$ также остаются постоянными. Таким образом, $АСВ_{1К}$ по отношению к активной зоне является постоянной вынуждающей силой, модулирующей нейтронный поток с частотой 8,6 Гц.

После нескольких перемещений органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) было замечено увеличение амплитуды колебаний потока нейтронов на частоте 8,6 Гц. Это явление связано с

резонансным возбуждением, которое возникает из-за того, что частота внешнего механического воздействия – гармоника с частотой 8 Гц, создаваемая перемещением ОР СУЗ, почти совпадает с центральной частотой низкодобротного резонанса $АСВ_{1К}$. Этот резонанс также представляет собой внешнее воздействие на активную зону, но уже барометрическое.

Таким образом, два различных физических явления – механическое и барометрическое — усиливают амплитуду потока нейтронов на частоте, близкой к 8,6 Гц.

В процессе работы реактора наблюдается взаимодействие процессов, имеющих одинаковую частоту. Это взаимодействие может быть как прямым, так и обратным. Органы регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) оказывают влияние на нейтронное поле, а нейтронное поле, в свою очередь, формирует ненулевой градиент вертикальных сил с частотой 8,6 Гц, воздействуя на ОР СУЗ.

В течение суток реактор переживает два переходных процесса: от 96 % мощности до 77 % и от 77 % до 96 %, а также два стационарных уровня мощности – 77 % и 96 %. Для реализации этих режимов органы управления мощностью многократно воздействуют на активную зону, создавая непрерывный нестационарный шумовой нейтронный процесс. Свойства шумового нейтронного поля реактора ВВЭР-1200 хорошо изучены, но только в стационарных режимах. Многократные перемещения ОР СУЗ приводят к резонансному возбуждению акустической стоячей волны ($АСВ_{1К}$), что, в свою очередь, способствует увеличению ее амплитуды. $АСВ_{1К}$ – это глобальное явление, которое доминирует в верхней части активной зоны. В нижней половине активной зоны резонансное возбуждение $АСВ_{1К}$ на частоте 8,6 Гц не наблюдается.

Поэтому шумовые нейтронные измерения следует проводить совместно с другими штатными измерениями во время испытаний маневренных режимов.

Заключение

Методы контроля, основанные на нейтронном шуме, обладают рядом неоспоримых преимуществ в выявлении и идентификации аномальных состояний оборудования. К числу ключевых достоинств можно отнести:

– отсутствие необходимости в активных действиях. Нейтронный шум, как естественный физический процесс, возникает без каких-либо манипуляций со стороны оператора;

– высокую чувствительность к отклонениям от нормы. Шумовые методы контроля способны улавливать даже малейшие изменения в состоянии оборудования, что делает их очень эффективными в диагностике;

– работу в условиях эксплуатации. Оценка нейтронного шума может использоваться, начиная с мощности РУ около 50 %, практически неограниченное время;

– точное определение местоположения дефектов. Нейтронный шум позволяет с высокой точностью определять расположение дефектов, что значительно облегчает поиск и устранение неисправностей;

– уникальность в отношении некоторых типов неисправностей. В некоторых случаях, когда другие методы не могут обеспечить точное выявление и оценку проблем, шумовые методы контроля являются незаменимыми.

Практические исследования в области нейтронного шума являются необходимыми, поскольку интерпретация различных аномалий, выявляемых с помощью шумовых методов, может быть сложной задачей. Кроме того, для точной настройки различных моделей и анализа спектральных характеристик оборудования требуются практические исследования. Эти различия могут проявляться не только в разных проектах реакторных установок, но и в пределах одной атомной электростанции.

Применение методов контроля на основе нейтронного шума значительно повышает наблюдаемость активной зоны без использования дополнительного оборудования, что в свою очередь способствует повышению уровня безопасности ядерной энергетической установки.

В режимах с частыми изменениями мощности реактора частота шагов регулирующих органов системы управления и защиты

значительно возрастает по сравнению с режимом постоянной мощности. Это приводит к высокочастотному воздействию на нейтронный поток и резонансному возбуждению нейтронного поля на частоте акустической стоячей волны – 8,6 Гц.

Для анализа режимов с частыми изменениями мощности необходимо проводить многоканальные шумовые нейтронно-вибрационные измерения, в дополнение к стандартным сигналам системы внутриреакторного контроля и системы виброакустического контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мительман М.Г., Розенблюм Н.Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. Москва: Энергоиздат, 1982. 78 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001093237/ (дата обращения: 13.09.2024).

2. Поваров В.П., Украинцев В.Ф., Голубев Е.И., Жук М.М. Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР-1200. Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. 264 с. EDN: SUYOSM. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=46457259 (дата обращения: 13.09.2024).

3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 756 с. EDN: Режим доступа: https://djvu.online/file/AMUs2BmF0nS10 (дата обращения: 13.09.2024).

4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Москва: ООО «Бином-Пресс», 2006 г. 656 с. Режим доступа: https://djvu.online/file/DW2v6v0QAUXzZ (дата обращения: 13.09.2024).

5. Randall R.B. Frequency analysis. Denmark: Bruel & Kjaer, 1987. 344 p. (In Eng.). Available at: https://a.co/d/54hR7mm (accessed: 13.09.2024).

6. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Монография (Ч.1). Москва: Наука, 2021. 216 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_shumovoymonitoring_2021/?ysclid=m3cys7lw94707251673 (дата обращения: 13.09.2024).

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

Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. Experience of carrying out comprehensive measurements using heterogeneous systems at various stages of the VVER-1200 power unit commissioning for operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika.* 2016;4:44–54. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05

8. Федоров А.И., Слепов М.Т. Комплексные измерения диагностических параметров оборудования на энергоблоке № 1 НВАЭС-2 в процессе опытно-промышленной эксплуатации. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика.* 2017;3:77–87. https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.07

Fedorov A.I., Slepov M.T. Comprehensive measurement of diagnostic parameters of equipment at the power unit № 1 of Novovoronezh NPP ii in the process of pilot operation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017;3:77–87. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.07

9. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Монография. Москва: Наука, 2018. 472 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_vibroakustika_2018/?ysclid=m3cyymryxt825179558 (дата обращения: 13.09.2024).

10. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика.* 2021;4:110–121. https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.10

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Phenomenology of acoustic standing waves applied to the VVER-1200 reactor plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021;4:110–121. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.10

11. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. Москва: Энергоатомиздат, 2004. 344 с. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/arkadov_sistemy-diagnostirovaniya-vver_2019/?ysclid=m3cz0m9w8v509642769 (дата обращения: 13.09.2024).

12. Проскуряков К.Н., Шакирзянов Ф.Н., Каратаев В.В. Способ предотвращения резонансных вибраций ТВЭЛ и ТВС ВВЭР-1000. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС.* 2008;23:18–25. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=17660521&ysclid=m3cz32gt29750510357 (дата обращения: 13.09.2024).

Proskuryakov K.N., Shakirzyanov F.N., Karataev V.V. A method for preventing resonant vibrations of TVEL and VVER-1000 fuel assemblies. *Voprosi atomnoi nayki I tehniki. Ser: Obespechenie bezopasnosti AES. Ser.: Ensuring the safety of nuclear power plants.* 2008;23:18–25. (In Russ.). Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=17660521&ysclid=m3cz32gt29750510357 (accessed: 13.19.2024).

13. Проскуряков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ядерных энергетических установок. Москва: МЭИ, 1984. 67 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01001236841 (дата обращения: 13.09.2024).

14. Драгунов Ю.Г., Дранченко Б.Н., Абрамов В.В., Хайретдинов В.У. Вибродинамические исследования в обоснование проектных решений ВВЭР. В сборнике: Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Т.2. Подольск, 2007. С. 356–375.

Dragunov Yu.G., Dranchenko B.N., Abramov V.V., Khayretdinov V.U. Dynamics and strength of water-moderated power reactors. In the collection: Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER. Vol.2. Podolsk, 2007. P. 356–375.

15. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ «быстрых» шумовых измерений динамических процессов ВВЭР. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика.* 2023;4:19–36. https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of fast noise measurements of dynamic VVER processes. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023;4:19–36. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.02

16. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.* 2023;4(143):51–61, https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Analysis of the noise component of direct charge sensor signals in maneuverable VVER modes. Trydi NGTY im. R.E. Alekseeva. 2023;4(143):51–61. (In Russ.). Available at: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_51

17. Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е., Лю Хайтао, Ли Йоу. Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай). *Атомная энергия.* 2007;103(5):277–282. Режим доступа: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2250/2229 (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E., Liu Haitao, Li Yo. Testing of improved algorithms controlling energy release in VVER-1000 in maneuvering regimes at the Tianwan Nuclear Power Plant (China). *Atomnaya energiya.* 2007;103(5):277–282. (In Russ.). Available at: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2250/2229 (accessed: 05.09.2024).

18. Аверьянова С.П., Ковель А.И., Мамичев В.В., Филимонов П.Е. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора». *Атомная энергия.* 2008;105(4):237–240 Режим доступа: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2639/2516 (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Kovel A.I., Mamichev V.V., Filimonov P.E. Development, implementation and current state of the calculation program «Reactor Simulator». *Atomnaya energiya.* 2008;105(4):237–240. (In Russ.). Available at: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2639/2516 (accessed: 05.09.2024).

19. Аверьянова С.П., Филимонов П.Е. Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200. *Атомная энергия.* 2009;107(6):348–351. Режим доступа: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1630/1610 (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Filimonov P.E. Xenon stability of VVER-1200. *Atomnaya energiya*. 2009;107(6):348–351 (In Russ.). Available at: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1630/1610 (accessed: 05.09.2024).

20. Аверьянова С.П., Дубов А.А, Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Работа ВВЭР-1200/130 в суточном графике нагрузки. *Атомная энергия.* 2012;113(5):247–252. Режим доступа: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1401/1382 (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. VVER-1200/1300 reactor operation in a dailyload curve. Atomnaya energiya. 2012;113(5):247–252. (In Russ.). Available at: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1401/1382 (accessed: 05.09.2024).

21. Аверьянова С.П., Дубов А.А, Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки. Атомная энергия. 2013;114(5):249–253. Режим доступа: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1124/1105 (дата обращения: 05.09.2024).

Averyanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Filimonov P.E. Development of methods for VVER-1200/1300 control in a daily load schedule. Atomnaya energiya. 2013;114(5):249–253. (In Russ.). Available at: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1124/1105 (accessed: 05.09.2024).

22. Глушенков Р.С. Исследование ключевых аспектов внедрения режима суточного регулирования мощности на АЭС Украины. *Технологический аудит и резервы производства.* 2015;2–1(22):18–26. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=23307141 (дата обращения: 02.09.2024).

Glushenkov R.S. Research of key aspects of load-following mode implementation at NPPs of Ukraine. *Technological audit and production reserves.* 2015;2–1(22):18–26. (In Russ.). Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=23307141 (accessed: 02.09.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:
Аркадов Г.В. – обработка результатов исследования, выявление закономерностей, проведение расчетов;
Слепов М.Т. – формулировка идеи и целей исследования, проведение исследований, представление экспериментальных данных с использованием методологии многоканальных синхронизированных измерений.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Геннадий Викторович Аркадов, кандидат технических наук, генеральный директор, Некоммерческое партнерство содействия развитию системной инженерии «Райз», г. Москва, Российская Федерация.
https://orcid.org/0009-0005-4464-9973
e-mail: arkgen47@gmail.com
Михаил Тимофеевич Слепов, кандидат технических наук, начальник отдела филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежской области, Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0001-5563-0526
e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Arkadov G.V. – processing of research results, identifying patterns, making calculations;
Slepov M.T. – formulating research idea and objectives, conducting research, presenting experimental data using multichannel synchronized measurement methodology.

FUNDING:
The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:
No conflict of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Gennady V. Arkadov, Cand. Sci (Eng), executive director, Non-profit Partnership for the Promotion of System Engineering «Rise», Moscow, Russian Federation.
https://orcid.org/0009-0005-4464-9973
e-mail: arkgen47@gmail.com

Mikhail T. Slepov, Cand. Sci (Eng), Head of Department, Novovoronezh NPP the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh, Voronezh Region, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0001-5563-0526
e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию / Received 16.09.2024
После доработки / Revised 14.11.2024
Принята к публикации / Accepted 19.11.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.5
https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-07
EDN SSEKBU
Оригинальная статья / Original paper

Диагностика состояний активной зоны ВВЭР-1000 по реактивностным возмущениям

В.Я. Шпицер ✉, **В.В. Кривин** ✉
Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Российская Федерация
✉ shpitser@mail.ru

Аннотация. В основе самоподдерживающейся цепной реакции деления ядер лежит вероятностная природа фундаментальных физических процессов. Мерой динамики этих процессов (идентификатором состояния) принято считать реактивность как особенное физическое свойство среды или технической системы. В статье предлагается отнести реактивность к классу случайных функций с нулевым математическим ожиданием в стационарном критическом состоянии. Флуктуации относительно нулевого значения воспринимаем как результат воздействия внешних факторов, вызывающих мгновенный отклик активной зоны (АЗ) реакторных установок (РУ), работающих на установленной мощности основную часть эксплуатационного времени. Этого определения достаточно, чтобы развивать методы технической диагностики по возмущениям реактивности АЗ. Активную зону реактора рассматриваем как стохастический объект, который удерживается в нормативном поле своих конструктивных и режимных характеристик. По архивным данным «измерений» реактивности определенным состояниям АЗ можно соотнести фрагменты стохастического временного ряда, которые служили бы идентификаторами этих состояний. Набор таких фрагментов (тестов) составляет библиотеку опыта эксплуатации АЭС. В настоящей работе рассматриваются эффекты внешнего пуассоновского возмущения реактивности и классификация возникающих при этом модуляций нейтронной плотности в рамках модели одногрупповой кинетики. Отражение в вероятностных характеристиках нейтронной плотности случайных статических и динамических режимных факторов через реактивность воспринимаем как свидетельство генерации дефектности активных зон РУ. Детерминированная составляющая нейтронной плотности достаточно точно описывается уравнениями кинетики и соответствует тренду математического ожидания реактивности относительно нулевого значения. Предлагается процедура обработки данных аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) и системы внутриреакторного контроля (СВРК) включающая: формирование библиотеки тестов-возмущений на основе архивных данных; анализ откликов по критерию согласия Колмогорова–Смирнова между эмпирическими функциями распределения текущей выборки эмпирических данных и вычисляемой по уравнениям кинетики на основе библиотеки возмущений. Утверждается, что предлагаемая процедура является средством идентификации уровня дефектности активной зоны РУ, а также может использоваться в качестве имитатора событий при глубоком обучении классифицирующей нейронной сети. Результаты относятся к достижениям нейтронно-шумовой диагностики.

Ключевые слова: кинетика, реактивность, пуассоновский поток, сигнатура, шумовая диагностика, дефектность, деградация.

Для цитирования: Шпицер В.Я., Кривин В.В. Диагностика состояний активной зоны ВВЭР-1000 по реактивностным возмущениям. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):71–79. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-07

For citation: Shpitser V.Y., Krivin V.V. Diagnostics of VVER-1000 core states by reactivity perturbations. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):71–79. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-07

Diagnostics of VVER-1000 core states by reactivity perturbations

Vladimir Y. Spitzer ✉ , **Valery V. Krivin**

© Шпицер В.Я., Кривин В.В., 2024

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

Abstract. The self-sustained nuclear fission chain reaction is based on the probabilistic nature of fundamental physical processes. The measure of the dynamics of these processes (state identifier) is taken to be reactivity as a special physical property of the medium or technical system. The paper proposes to attribute reactivity to the class of random functions with zero mathematical expectation in the stationary critical state. Fluctuations with respect to zero value are perceived as a result of external factors causing an instantaneous response of the core of reactor plants operating at the installed power for the main part of the operating time. This definition is sufficient to develop methods of technical diagnostics based on perturbations of the reactivity of the core. The reactor core is considered as a stochastic object that is kept within the normative field of its design and regime characteristics. According to the archive data of reactivity 'measurements', it is possible to correlate to certain states of the reactor core the fragments of stochastic time series, which would serve as identifiers of these states. The set of such fragments (tests) constitutes a library of NPP operation experience. In the present work, the effects of an external Poisson perturbation of reactivity and the classification of neutron density modulations arising therefrom are considered in the framework of the one-group kinetics model. The reflection in the probabilistic characteristics of neutron density of random static and dynamic regime factors through reactivity is perceived as evidence of generation of defectiveness of the reactor core. The deterministic component of neutron density is described quite accurately by the equations of kinetics and corresponds to the trend of the mathematical expectation of reactivity with respect to zero value. A procedure of processing the data of neutron flux control equipment and reactor intrinsic control system is proposed, which includes formation of a library of test perturbations on the basis of archived data; analysis of responses by the Kolmogorov-Smirnov criterion of agreement between the empirical distribution functions of the current sample of empirical data and those calculated by the equations of kinetics on the basis of the library of perturbations. It is argued that the proposed procedure is a means of identifying the defect level of the core and can also be used as an event simulator in deep learning of a classifying neural network. The results refer to the achievements of neutron-noise diagnostics.

Keywords: kinetics, reactivity, Poisson flow, signature, noise diagnostics, defectivity, degradation.

Введение

Любое изменение технологических параметров АЗ влияет на ее реактивность. При этом технологические параметры тесно связаны друг с другом, обусловливая соответствующие эффекты реактивности (температурный, барометрический, гидродинамический, мощностной, связанные с выгоранием топлива и эффектами отравления). Нейтронно-шумовая диагностика АЗ основана на установленной связи изменения физических характеристик и устойчивости критического состояния со стохастической составляющей реактивности [1].

Основным генератором случайных возмущений реактивности являются флуктуации температуры и плотности при турбулентном течении теплоносителя [2,3]. Кроме того, главный циркуляционный насос (ГЦН) РУ выступает как источник гармонических пульсаций давления, влияющих на теплообмен в АЗ [4]. Флуктуации реактивности, являются следствием многочисленных микроскопических событий. Это значит, что вероятностные характеристики макроскопических явлений можно получить, рассматривая совокупность отдельных актов механических и гидродинамических взаимодействий металлоконструкций, теплоносителя и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ).

Достаточно общей моделью последовательностей этих актов является временной ряд независимых элементарных импульсов, имеющих случайные параметры (амплитуду, фазу, длительность) и возникающие в случайные моменты времени. Если частота следования импульсов мала (≤ 10 1/с), то закон распределения вероятности макроскопической величины значительно отличается от нормального [5]. Основная гипотеза этой работы состоит в том, что помеха рассматривается как некоторый естественный тест, поступающий на вход вместе с регулярным сигналом, а диагностика – это классификация откликов нейтронной плотности на эти тесты.

В статье в качестве стохастического возмущения используется неоднородный пуассоновский поток реактивности, который воспринимается как материальный носитель элементарных дефектных состояний. Накоп-

ление дефектности (эволюция АЗ) является причиной деградации [6].

Модель возмущения реактивности

Математической моделью совершенно случайной последовательности событий является пуассоновский процесс. Числовые характеристики пуассоновского процесса известны [7]:

$M\xi_p = \lambda$ – среднее (ξ_p – пуассоновская случайная величина); $D\xi_p = \lambda$ – дисперсия; $\beta_1 = 1/\sqrt{\lambda}$ – асимметрия; $\beta_2 = 1/\lambda$ – эксцесс.

События отмечаются на оси времени с некоторой частотой наступления, среднее значение которой характеризуется вероятностной интенсивностью потока событий (λ). Интервалы между событиями на оси времени подчиняются экспоненциальному распределению. С ростом (λ) пуассоновское распределение асимптотически нормально. Это позволяет использовать пуассоновские потоки в качестве инструмента аппроксимации эмпирических временных рядов, содержащих аддитивную помеху. В работе используется следующая парадигма:

1. Зададим ансамбль пуассоновского потока флуктуации реактивности в форме матрицы ρ_{ij}.

2. Получим (посредством прямого решения уравнений кинетики) представление плотности нейтронов в форме матрицы n_{ij}.

3. Определим фактические значения параметров пуассоновского потока из условия однородности расчетной матрицы n_{ij} и аналогичной матрицы, составленной по измеряемым данным.

Неоднородный пуассоновский поток событий (выборочных значений) формируется методом прямого статистического моделирования и основывается на алгоритмической формуле (стилистика записи алгоритма соответствует формату Mathcad) (1):

$$\Delta\tau := 0.1 \qquad A := rnorm(300,\ 0.0000,\ 0.0011)$$
$$\lambda := 0.5$$

$$\rho := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..100 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{for } j \in 0..299 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \xi \leftarrow rnd(1) \\ \rho_{i,j} \leftarrow A_j \text{ if } \xi < \lambda\Delta \\ 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ \rho \end{array} \right. \\ \rho \end{array} \right. , \quad (1)$$

где ρ – матрица реактивности;

A – мгновенное значение реактивности (случайная величина, распределенная нормально (0,σ = 0.0011));

i – индекс реализации в статистическом ансамбле;

j – индекс значения во временном ряду;

γ – случайное число равномерно распределенное на интервале (0, 1);

Δτ – шаг дискретизации по времени (0.1 с., параметр измерительного комплекса).

Это двухпараметрическая модель эволюции дефектности АЗ по каналам дисперсии мгновенных значений (σ) и частоты следования импульсов реактивности (λ) относительно базового значения равного нулю. Внесение трендов и циклических составляющих в математическое ожидание, дисперсию и интенсивность импульсов возмущений реактивности образует многопараметрическую, достаточно универсальную, платформу моделирования стохастических возмущений АЗ. Преимущество двухпараметрической модели в интерпретируемом физическом содержании параметров.

На рисунке 1 приведены две реализации пуассоновского процесса на интервале наблюдения 30 сек.

Этот рисунок иллюстрирует импульсное возмущение реактивности относительно базового значения равного нулю за счет неядерных внешних факторов, воспринимаемых как дефекты АЗ. Если в качестве исходных данных используются непосредственно показания штатных реактиметров, то индикатором дефектности АЗ может служить, например, коэффициент вариации [σ(ρ)/mean(ρ)] в текущей выборке относительно назначенного нормативного коридора.

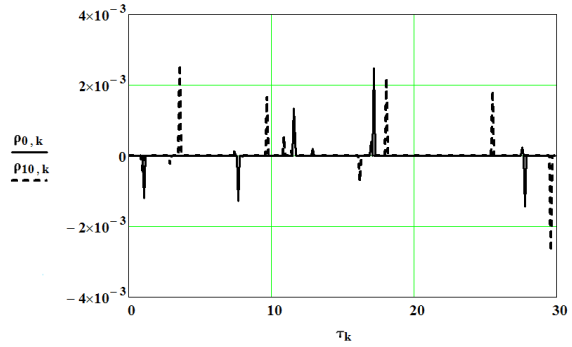


Рисунок 1. *Реализации № 0 и № 10 пуассоновского потока (σ = 0.0011; λ = 0.5) возмущения реактивности продолжительностью 30 сек.*
Figure 1. *Realisations of No. 0 and No. 10 Poisson flow (σ = 0.0011; λ = 0.5) reactivity perturbations of 30 sek. duration*

На рисунках 2, 3 приведены эволюция среднего значения mean(ρ) и коэффициента вариации [σ(ρ)/mean(ρ)] реактивности для модельного ансамбля из 100 реализаций.

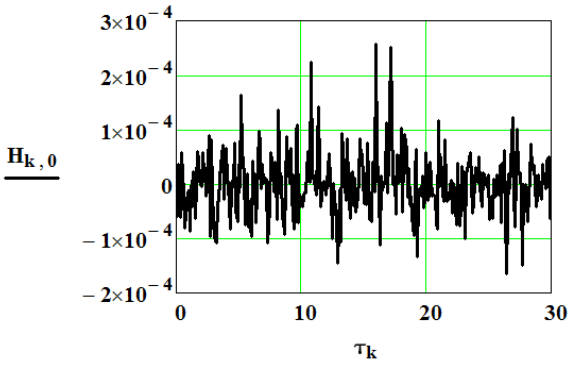


Рисунок 2. *Эволюция среднего значения $H_{k,0}$=mean(ρ) реактивности по ансамблю 100 реализаций*
Figure 2. *Evolution of the mean Hk,0=mean(ρ) reactivity over an ensemble of 100 implementations*

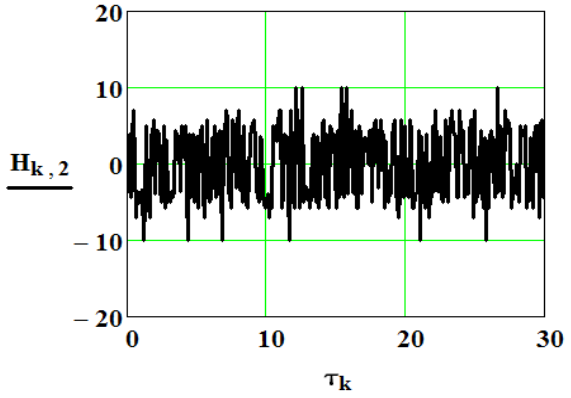


Рисунок 3. *Коэффициент вариации $H_{k,2}$=[σ(ρ)/mean(ρ)] реактивности по ансамблю 100 реализаций*
Figure 3. *Coefficient of variation Hk,2=[σ(ρ)/mean(ρ)] of reactivity over an ensemble of 100 implementations*

Эти рисунки иллюстрируют, что пуассоновские потоки и однородные им временные ряды штатно «измеряемой» реактивности при работе на установленной мощности могут классифицироваться и обрабатываться как некоторая форма технологического шума. Это является предпосылкой специализированной шумовой диагностики АЗ.

Следует заметить, что при реальном мониторинге состояния АЗ матрица ρ заполняется и обновляется постепенно. Размерность матрицы с одной стороны ограничивается допустимой статистической, а с другой допускаемой динамической погрешностями фиксируемых мгновенных состояний АЗ. Помимо среднего значения и его вариации, введем в анализ индикатор дефектности $R = \left[\max(\rho^{\langle j \rangle}) - \min(\rho^{\langle j \rangle}) \right] / (b-a)$ – размах значений в каждом столбце, нормированный на ширину нормативного поля (a – минимальное значение; b – максимальное значение). Ширина нормативного поля – это эксплуатационный параметр (подбирается на основе анализа архивных данных). Индикатор $R \geq 1$ фиксирует деградацию АЗ. Таким образом, специализированная система шумовой диагностики дефектных состояний АЗ может быть сконструирована на основе мониторинга описанных непараметрических показателей в стационарных режимах.

Промышленное «измерение» реактивности основано на решении обратной задачи кинетики в точечном приближении с учетом шести групп запаздывающих нейтронов в режиме реального времени [8]. Реактиметр является нелинейным функциональным преобразователем сигналов аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) и системы внутриреакторного контроля (СВРК). Погрешность «измерений» реактивности относительно теоретического значения может достигать (±10 %), а функция распределения значительно отличаться от нормальной. Это ограничивает чувствительность диагностики, основанной на анализе статистических свойств случайной составляющей «измерений» реактивности. Действительный поток реактивности можно восстановить, рассмотрев задачу параметрической идентификации возмущений нейтронной плотности.

Модель возмущения нейтронной плотности

Рассмотрим реактор ВВЭР -1000 с параметрами АЗ [8]:

n_0 = 3000 (1000) МВт – регламентное значение тепловой (электрической) мощности;

l^* = 0.001 сек – среднее время жизни поколения нейтронов;

$\beta_{эфф}$ = 0.0064 – эффективная доля запаздывающих нейтронов;

λ = 0.076 сек$^{-1}$ – средняя постоянная распада эквивалентного ядра-предшественника.

Решение уравнений кинетики при учете одной группы запаздывающих нейтронов описывается разностью двух экспонент (2):

$$n(\tau) = n(0)\left[\frac{\beta_{эфф}}{\beta_{эфф}-\rho(\tau)}\exp\left(\frac{\lambda\rho(\tau)}{\beta_{эфф}-\rho(\tau)}\tau\right) - \frac{\rho(\tau)}{\beta_{эфф}-\rho(\tau)}\exp\left(-\frac{\beta_{эфф}-\rho(\tau)}{l^*}\right)\right] \quad (2)$$

Приводим это выражение к матричной форме (3):

$$n_{i,j} = n_0\left[\frac{\beta_{эфф}}{\beta_{эфф}-\rho_{i,j}}e^{\left(\frac{\lambda\cdot\rho_{i,j}}{\beta_{эфф}-\rho_{i,j}}\tau_j\right)} - \frac{\rho_{i,j}}{\beta_{эфф}-\rho_{i,j}}e^{\left(-\frac{\beta_{эфф}-\rho_{i,j}}{l}\tau_j\right)}\right] \quad (3)$$

Выражение (3) будем использовать в качестве имитатора АЗ для всех внешних возмущений (тестов) по каналу реактивности.

На рисунке 4 приведены две гипотетические реализации возмущения нейтронной плотности на интервале наблюдения 30 сек.

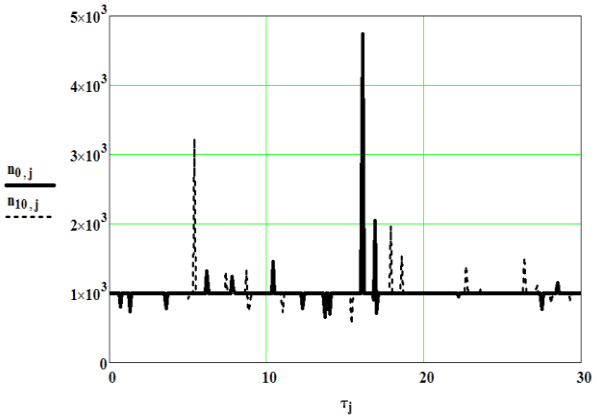


Рисунок 4. *Реализации №0 и №10 возмущения нейтронной плотности на интервале продолжительностью 30 сек.*

Figure 4. *Implementations No. 0 and No. 10 of the neutron density perturbation over a 30-second interval*

Этот рисунок показывает возможность реализации (в одногрупповой модели) редких мгновенных аномальных амплитудных значений.

На рисунках 5, 6 приведены эволюция среднего значения и коэффициента вариации [σ(*n*)/mean(*n*)] возмущения нейтронной плотности по ансамблю 100 реализаций.

Рисунки иллюстрируют сглаженный характер осредненных значений флуктуаций нейтронной плотности (в отличии от мгновенных импульсов теоретической модели рис. 4). Эти модуляции и определяют фиксируемый технический эффект.

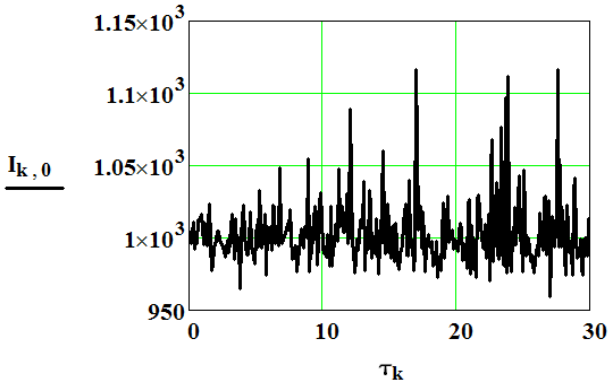


Рисунок 5*. Эволюция среднего значения $I_{k,0}$=mean(n) возмущения нейтронной плотности по ансамблю 100 реализаций*

Figure 5*. Evolution of the mean value Ik,0=mean(n) of the neutron density perturbation over an ensemble of 100 implementations*

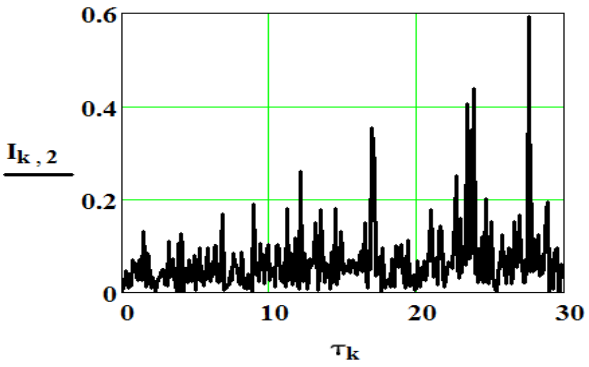


Рисунок 6. *Коэффициент вариации $I_{k,2}=[\sigma(n)/mean(n)]$ возмущения нейтронной плотности по ансамблю 100 реализаций.*

Figure 6*. Coefficient of variation $Ik,_2=[\sigma(n)/mean(n)]$ of the neutron density perturbation over the ensemble of 100 implementations*

Восстановление действительного потока реактивности

Воспользуемся пуассоновской моделью реактивности для решения обратной задачи нейтронной кинетики, сформулировав ее в форме задачи параметрической идентификации.

На временном ряду, измерений датчиками нейтронной плотности штатной системы мониторинга n_{emp} зададим эмпирическую функцию распределения $F_{emp}(N)$. В стационарном режиме адекватность этой функции зависит только от используемого объема измеренных данных.

На равноразмерном имитационном временном ряду отклика $n_{расч}$ генерируемом пуассоновской моделью реактивности зададим расчетную функцию распределения $F_{расч}(N, \sigma, \lambda)$. Адекватность этой функции зависит от объема генерируемых данных, полноты используемой модели кинетики и параметров стохастической модели реактивности.

Обе функции определяются по вариационным рядам $\{x_i\}$ из соотношений (4):

$$F_N(x)=\frac{1}{N}\Sigma_{1\le i\le N} I\left(x,x_i\right)$$
$$I\left(x,x_i\right)=\begin{cases}0, & x\le x_i\\ 1 & x>x_i\end{cases}. \quad (4)$$

Воспользуемся статистикой критерия Колмогорова для оценки значений элементов кортежа (σ, λ) пуассоновского потока [9,10] (5):

$$D_N=\sup_{|x|<\infty}\left|Femp(N)-F_{расч}(N,\sigma,\lambda)\right|. \quad (5)$$

Исходим из требования однородности этих распределений в форме (6):

$$S_K=\frac{6ND_N+1}{6\sqrt{N}}, \quad (6)$$

где $D_N=\max\left(D_N^+, D_N^-\right)$,

$$D_N^+=\max_{1\le i\le N}\left\{F_{расч}(x_i,\sigma,\lambda)-\frac{i-1}{N}\right\},$$

$$D_N^-=\max_{1\le i\le N}\left\{Femp(x_i)-\frac{i-1}{N}\right\}.$$

Если для вычисленного по выборке значения статистики S_K^* выполняется неравенство (7):

$$P\left(S>S_K^*\right)=1-K\left(S_K^*\right)<\alpha, \quad (7)$$

где $K\left(S_K^*\right)=\Sigma_{k=-\infty}^{\infty}(-1)^k e^{-k^2S_K^{*2}}$,

α – уровень значимости, то принимается гипотеза H_0: $F_{emp}(N) = F_{расч}(N,\sigma,\lambda)$ – распределения однородны (принадлежат одной генеральной совокупности).

Кортеж (σ, λ), обеспечивший выполнение условия однородности эмпирических распределений, назначается сигнатурой пуассоновского процесса и сохраняется в архиве. В противном случае выбираются новые параметры модели возмущения реактивности и поиск возобновляется. Модели возмущения реактивности, соответствующие найденным сигнатурам, объявляются эмпирическими тестами.

Данную технологию продемонстрируем на следующем простом примере. На рисунке 7 приведена реализация пуассоновского процесса с параметрами λ = 5; σ = 0.0005; Δτ = 0.1 на интервале наблюдения 30 сек.

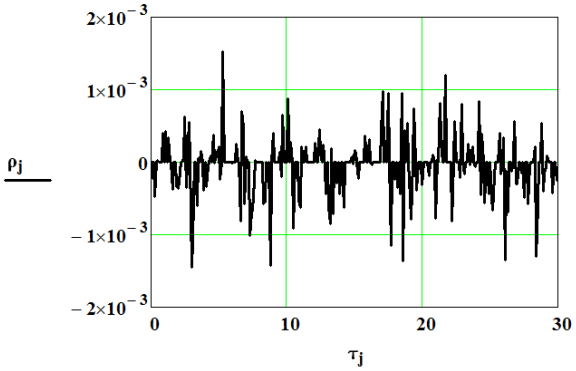


Рисунок 7. *Реализация пуассоновского процесса λ = 5; σ = 0.0005; Δτ = 0.1 на интервале наблюдения 30 сек.*
Figure 7. *Implementation of the Poisson process λ = 5; σ = 0.0005; Δτ = 0.1 at an observation interval of 30 sec.*

Этот рисунок иллюстрирует флуктуации реактивности относительно нулевого значения при работе на установленной мощности.

На рисунке 8 представлена реализация возмущения нейтронной плотности (с нормировкой n_0=1000 МВт) на интервале продолжительностью 30 сек.

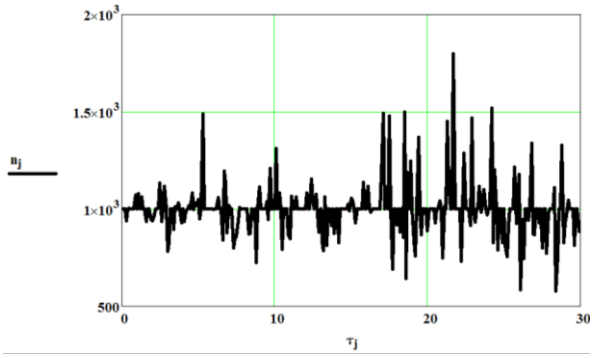


Рисунок 8. *Реализация возмущения нейтронной плотности на интервале 30 сек.*
Figure 8. *Implementation of the neutron density perturbation at the interval of 30 sec.*

Этот рисунок иллюстрирует флуктуации мощности (нейтронной плотности) относительно установленного значения (1000 МВт).

Пусть истинная (измеряемая) нейтронная плотность распределена по нормальному закону такому, что среднее значение удерживается нормативном интервале (995-1005) МВт с погрешностью (± 10 %)

На рисунке 9 представлены модельная функция распределения возмущенной нейтронной плотности $F(y)$ и измеряемая плотность, распределенная по нормальному закону $N(y)$.

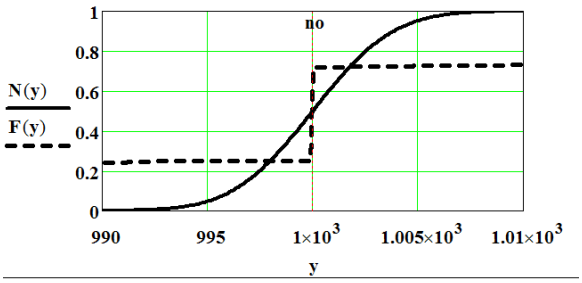


Рисунок 9. *Эмпирическая функция распределения F(y). Функция нормального распределения N(y).*
Figure 9. *Empirical distribution function F(y). Normal distribution function N(y).*

Этот рисунок демонстрирует очевидную возможность для любых генераторов возмущения реактивности получать параметры идентификации (σ, λ) подгонкой, обеспечивающей совмещение кривых.

Непосредственный элемент оборудования АЗ, генерирующий возмущения реактивности, устанавливается по корреляции идентифицированного пуассоновского процесса со стохастическими составляющими измерений: температуры, давления и вибрации. Воспользуемся системным определением дефектности АЗ – «вероятность превышение предела».

Вычислим для рассмотренных возмущенной и нормальной функций распределения мощности (нейтронной плотности) вероятность значений вне нормативного поля:

$Def_F = 1 + F(995) - F(1005)$. $Def_F = 0.525$;
$Def_N = 1 + N(995) - N(1005)$. $Def_N = 0.096$.

Эти оценки отражают неоднородность распределений $F(y) \neq N(y)$. Рассогласование распределений минимизируется предложенной процедурой. Временной ряд индикатора Def_N представляет эволюцию дефектности, а тренд деградацию АЗ.

Заключение

Предлагается система мониторинга текущего состояния и оценки уровня дефектности АЗ РУ, сконструированная на измерениях сигналов аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) и системы внутриреакторного контроля (СВРК) в стационарных режимах.

Вариацией параметров расчетной модели достигается условие однородности модельной и эмпирической функций распределения. При выполнении критерия Колмогоро-

ва-Смирнова фиксируются соответствующие значения элементов кортежа (σ, λ) пуассоновского потока. Кортеж (σ, λ) назначается сигнатурой пуассоновского процесса и сохраняется в архиве как элемент библиотеки показателей эксплуатации АЗ РУ.

Модели возмущения реактивности, соответствующие найденным сигнатурам, объявляются эмпирическими тестами. Они являются решениями обратной задачи кинетики АЗ.

На плоскости (σ, λ) визуализируется эволюция состояния АЗ в форме траектории σ(λ). Иллюстрацией деградации АЗ является тренд зависимости от времени эмпирической вероятности превышения эксплуатационных пределов установленной мощности (плотности нейтронов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Москва: Наука, 2021. 221 с. Режим доступа: https://elibrary.ru/okrpeg?ysclid=m4gxqqmdmi155074242 (дата обращения: 26.11.2024).

2. Проскуряков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ядерных энергетических установок. Москва: МЭИ, 1984. 67 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01001236841 (дата обращения: 26.11.2024).

3. Федоров А.И., Проскуряков М.В., Запорожец М.В., Иванов С.В. Повышение надежности функционирования энергоблоков АЭС на основе данных виброакустической паспортизации. *Вестник ВГТУ*. 2014;10(5-1):85–91. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadezhnosti-funktsionirovaniya-energoblokov-aes-na-osnove-dannyh-vibroakusticheskoy-pasportizatsii (дата обращения: 26.11.2024).

Fedorov A.I., Proskuryakov M.V., Zaporozhets M.V., Ivanov S.V. Improving the reliability of NPP power units based on vibroacoustic certification data. *Bulletin of VSTU*. 2014;10(5-1):85–91. (In Russ.). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadezhnosti-funktsionirovaniya-energoblokov-aes-na-osnove-dannyh-vibroakusticheskoy-pasportizatsii (accessed: 26.11.2024).

4. Проскуряков К.Н., Запорожец М.В. Исследование акустических колебаний в реакторных установках и перспективы их использования для обоснования остаточного ресурса. *Вестник МЭИ*. 2016;5:19–24. Режим доступа: https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/93 (дата обращения: 26.11.2024).

Proskuryakov K.N., Zaporozhets M.V. Investigation of acoustic vibrations in reactor installations and prospects for their use to substantiate the residual resource. *Bulletin of the MEI*. 2016;5:19–24. (In Russ.). Available at: https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/93 (accessed: 26.11.2024).

5. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Монография. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2005. 258 с. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=19449479&ysclid=m4h1yj9168480893214 (дата обращения: 26.11.2024).

6. Украинцев В.Ф. Эффекты реактивности в энергетических реакторах. Обнинск: Обнинский институт атомной энергетики, 2001. 58 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01000704994 (дата обращения: 26.11.2024).

7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников. Москва: Физматлит, 2006. 813 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01002917693 (дата обращения: 26.11.2024).

8. Казанский Ю.А., Слекеничс Я.В. Кинетика ядерных реакторов. Коэффициенты реактивности. Введение в динамику. Москва: НИЯУ МИФИ, 2012. 300 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01006761901?ysclid=m4h2kp52jy723354596 (дата обращения: 26.11.2024).

9. Ширяев А.Н. Стохастические задачи о разладке. Москва: МЦНМО, 2017. 391 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01009447149?ysclid=m4h2mzpi4i983560499 (дата обращения: 26.11.2024).

10. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению. Москва: Инфра-М, 2017. 164 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01008691530 (дата обращения: 26.11.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:
Шпицер В.Я. – предложение системы мониторинга текущего состояния и оценки уровня дефектности АЗ РУ, сконструированной на измерениях сигналов аппаратуры контроля нейтронного потока и системы внутриреакторного контроля в стационарных режимах.

AUTHORS' CONTRIBUTION:
Shpitser V.Y. – proposing of a system for monitoring the current state and assessing the level of defects reactor plant core designed on measurements of neutron flux monitoring equipment and in-reactor monitoring system signals in steady-state modes.

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

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

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования. Инициативное исследование.

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:
There is no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Владимир Яковлевич Шпицер, доктор технических наук, профессор кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0002-5051-5091
e-mail: shpitser@mail.ru

Валерий Вольфович Кривин, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0003-0903-0786
e-mail: VVKrivin@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Vladimir Y. Shpitser, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Nuclear Power Engineering, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0002-5051-5091
e-mail: shpitser@mail.ru

Valery V. Krivin, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department of Information and Control Systems, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0003-0903-0786
e-mail: VVKrivin@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 02.10.2024
После доработки / Revised 03.12.2024
Принята к публикации / Accepted 05.12.2024

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

УДК 53.084.4: 621.311.25
https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08
EDN TGXPIS
Оригинальная статья / Original paper

Анализ погрешности тарировки электропривода запорной арматуры АЭС

А.А. Лапкис [1,2], Л.В. Цыхлер [1], В.Н. Никифоров [1], В.П. Егорова [1]
[1] *Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация*
[2] *Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Ростовская АЭС, г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация*
✉ *AALapkis@mephi.ru*

Аннотация. В статье описан результат исследований, нацеленных на разработку переносного комплекса для проведения оперативной безразборной диагностики и тарировки ограничителей крутящего момента электроприводной арматуры (ЭПА) по месту ее эксплуатации (ПК ОКМП). Описаны концепция и методика тарировки электропривода по месту его установки на ЭПА. Приведено описание программно-технического комплекса, реализующего данную концепцию. Описаны основные результаты испытаний комплекса, которые показали его применимость для выполнения диагностики ЭПА на АЭС. Выполнены статистические испытания в целях разработки и аттестации методик измерения. Для этого проведен анализ неопределенности результата тарировки электропривода, которую вносит сама процедура тарировки. Показано, что влияние датчика крутящего момента, устанавливаемого с помощью специально разработанной оснастки между арматурой и электроприводом, незначимо и влияет только на второстепенные диагностические параметры. Таким образом, подтверждена возможность совмещения операций базового испытания электропривода и технического диагностирования ЭПА. Полученные результаты испытаний использованы для составления и метрологической аттестации методики прямого и косвенного измерения крутящего момента ЭПА по месту ее эксплуатации.

Ключевые слова: арматура, АЭС, электропривод, крутящий момент, базовые испытания, техническая диагностика, тарировка, погрешность, метрологическая аттестация.

Для цитирования: Лапкис А.А., Цыхлер Л.В., Никифоров В.Н., Егорова В.П. Анализ погрешности тарировки электропривода запорной арматуры АЭС. *Глобальная ядерная безопасность.* 2024;14(4):80–90. https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08

For citation: Lapkis A.A, Tsykhler L.V., Nikiforov V.N., Egorova V.P. Analysis of calibration error of NPP shut-off valve electric drive. *Global nuclear safety.* 2024;14(4):80–90. (In Rus.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-08

Analysis of calibration error of NPP shut-off valve electric drive

Aleksandr A. Lapkis [1, 2], Lev V. Tsykhler [1], Viktor N. Nikiforov [1], Vera P. Egorova [1]
[1] *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*
[2] *Rostov Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*
✉ *AALapkis@mephi.ru*

Abstract. The article describes the result of the research aimed at the development of a portable complex for carrying out rapid, non-disassembly diagnostics and calibration of torque limiters of motor operated valves at the place of their operation (multimedia training program). The concept and methodology of electric drive calibration at the place of its installation on the motor operated valves is described. The description of the software and hardware complex realizing this concept is given. The main test results of the complex which showed its applicability for motor operated valves diagnostics at NPPs are described. Statistical tests are performed in order to develop and certify measurement tech-

© Лапкис А.А, Цыхлер Л.В., Никифоров В.Н., Егорова В.П., 2024

niques. The uncertainty of the electric drive calibration result which is introduced by the calibration procedure itself is analysed. It is shown that the influence of torque sensor installed with the help of specially designed tooling between valve and electric drive is insignificant and affects only minor diagnostic parameters. Thus, the possibility of combining the operations of the basic drive testing and technical diagnostics of an electric drive has been confirmed. The obtained test results are used for the development and metrological certification of the methodology of direct and indirect torque measurement of the motor operated valves at the place of its operation.

Keywords: valves, NPP, electric drive, torque, basic tests, technical diagnostics, calibration, error, metrological certification.

Общие положения

Значительная часть дефектов электроприводной арматуры (ЭПА) АЭС, возникающих при эксплуатации, представляет собой негерметичность в затворе и различного рода дефекты подвижных частей – тугой ход, низкая плавность хода, заклинивание, отсутствие затяга запорного органа, отрыв штока и т.д. Часть таких дефектов носит износовый характер, а часть – обусловлена некорректной настройкой моментных и концевых выключателей привода [1,2]. Некорректное значение крутящего момента привода, передаваемое на запорный орган ЭПА, может привести как к негерметичности в затворе, так и к повреждениям подвижных частей арматуры.

Чтобы при эксплуатации определить крутящий момент, развиваемый электроприводом арматуры, нужно измерить потребляемую им мощность и пересчитать ее в момент по тарировочной характеристике. Эта процедура предусмотрена действующим стандартом АО «Концерн Росэнергоатом»[1] как часть базовых испытаний электропривода.

Разработка диагностического комплекса

С целью повышения качества выявления как износовых дефектов, так и проблем настройки электропривода, НИИ атомного энергетического машиностроения (НИИ АЭМ) ВИТИ НИЯУ МИФИ выполнил в 2022-2024 гг. в интересах АО «Концерн Росэнергоатом» НИОКР по разработке переносного диагностического комплекса.

«Переносной комплекс для проведения оперативной безразборной диагностики и тарировки ограничителей крутящего момента ЭПА по месту ее эксплуатации» (ПК ОКМП) совмещает функции оперативной диагностики ЭПА по сигналам силы тока и напряжения питающей сети привода с его тарировкой путем одновременной регистрации указанных электрических параметров и крутящего момента по месту эксплуатации ЭПА. Для более качественного и оптимизированного планово-предупредительного ремонта требуется сокращение объемов работ в данный период [3], с чем поможет использование ПК ОКМП. ПК ОКМП включает преимущественно российские и белорусские компоненты: измерительный преобразователь напряжения, первичные преобразователи силы тока, напряжения и крутящего момента.

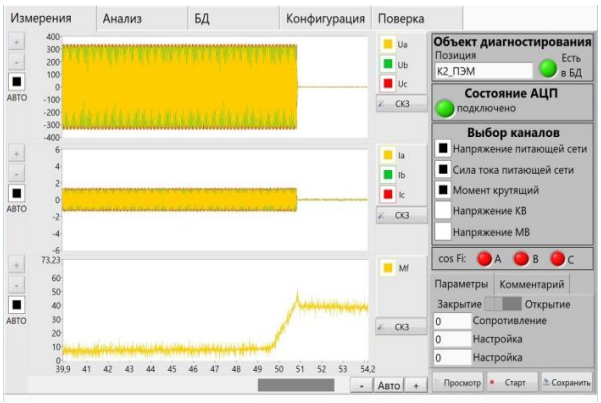
Тарировка электропривода обеспечивается путем одновременной регистрации электрических сигналов и фактического крутящего момента электропривода на месте его установки на ЭПА. Методические основы такой тарировки были заложены предыдущими работами НИЯУ МИФИ [4]. В настоящее время известны ЭПА со встроенными датчиками момента, что позволяет проводить одновременную регистрацию описанных выше параметров [5], но данное оборудование требует больших трат на ввод его в эксплуатацию на АЭС. Поэтому подавляющее количество электроприводов запорной арматуры на атомных станциях России не имеет встроенного датчика момента, что требует их тарировки на стенде[2] или с по-

[1] СТО 1.1.1.02.002.1857-2021. Техническое диагностирование электроприводной трубопроводной промышленной арматуры на энергоблоках атомных станций. – АО «Концерн Росэнергоатом». – Стандарт организации. – Москва, 2021. – 60 с.

[2] АО «Атомтехэнерго» представило свои инновационные разработки. АО «Атомтехэнерго». – Режим доступа: https://atech.ru/news/ao-atomtekhenergo-predstavilo-svoi-innovatsionnye-razrabotki/ (дата обращения: 02.07.2024).

мощью подключения внешнего датчика. Для установки датчика крутящего момента между арматурой и электроприводом применяется специально разработанная оснастка. К настоящему моменту разработан ряд комплектов оснастки для приводов с присоединительными размерами, соответствующими ГОСТ 34287-2017[3]. Общий вид комплекса в процессе тарировки электропривода на стенде ВИТИ НИЯУ МИФИ показан на рисунке 1*а*, экранная форма регистрации сигналов – на рисунке 1*б*.

а



б

Рисунок 1. *а – Тарировка привода задвижки DN150 с помощью ПК ОКМП на стенде ВИТИ НИЯУ МИФИ; б – Экранная форма регистрации ПК ОКМП, затяг клиновой задвижки*

Figure 1. *a – DN150 gate valve drive calibration with the help of multimedia training program at VETI MEPhI bench; b – Multimedia training program registration screen form, wedge gate valve tightening*

[3] ГОСТ 34287-2017. Межгосударственный стандарт Арматура трубопроводная. Приводы вращательного действия. Присоединительные размеры. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200161191 (дата обращения: 02.07.2024).

Испытания показали, что тарировочная характеристика может быть получена даже при однократной регистрации электрических сигналов и момента при обычном рабочем цикле ЭПА. На рисунках 2–5 показаны соответствующие сигналы и тарировочная характеристика привода арматуры, отображенная на рисунке 1.

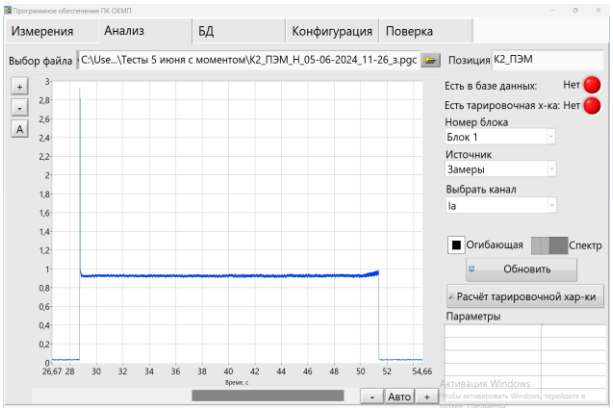


Рисунок 2. *Огибающая силы тока при закрытии ЭПА*

Figure 2. *Current envelope during closing of the motor operated valve*

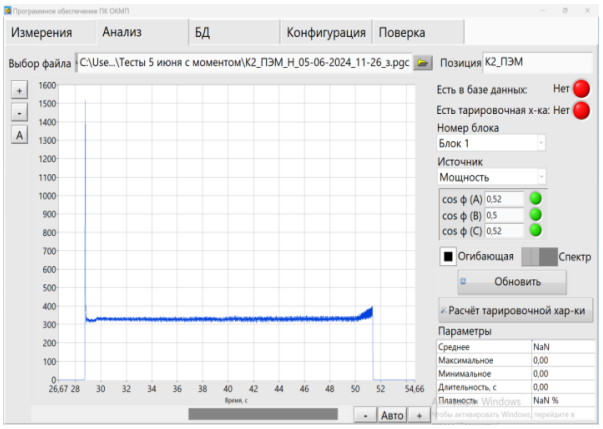


Рисунок 3. *Огибающая мощности при закрытии ЭПА*

Figure 3. *Power envelope at closing of the motor operated valve*

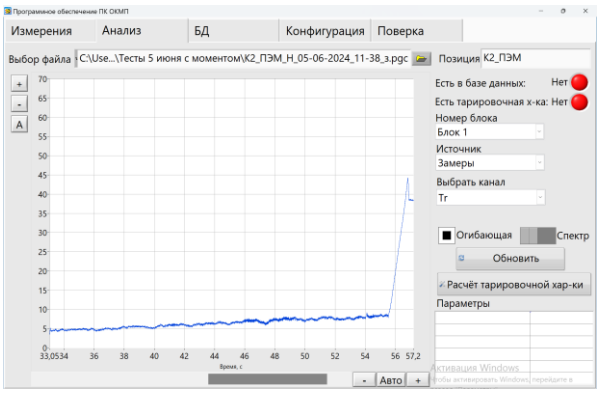


Рисунок 4. *Измеренный момент при закрытии ЭПА*

Figure 4. *Measured torque at closing of the motor operated valve*

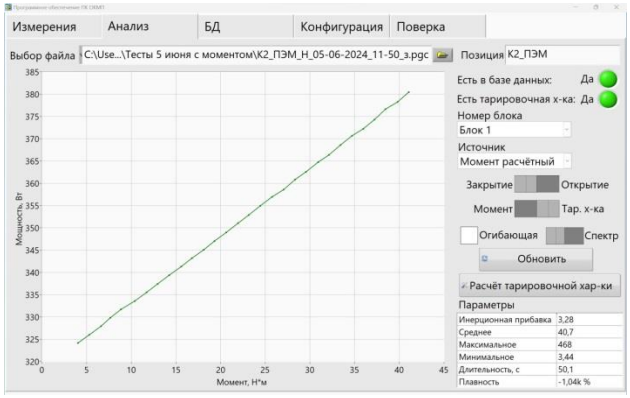


Рисунок 5. *Тарировочная характеристика привода при закрытии ЭПА*
Figure 5. *Drive calibration characteristic at closing of the motor operated valve*

Анализ погрешности

При диагностике и тарировке электропривода трубопроводной арматуры «потребителя» – как правило, это цех-владелец – интересует степень достоверности полученного результата. Неопределенность измерений электрических параметров, крутящего момента, процедуры расчета тарировочной характеристики, неопределенность во времени срабатывания моментного выключателя порождают погрешность в определении крутящего момента затяга арматуры при ее штатной оперативной диагностике. То есть значения диагностических параметров (рабочий ток, плавность хода, мощность и момент затяга) являются оценками случайных величин. Поэтому при диагностировании ЭПА назревает необходимость перехода от точечных оценок диагностических параметров, общепринятых сейчас, к интервальным. В рамках действующей системы единства измерений корректная интервальная оценка является результатом применения аттестованной методики измерения. Такая методика «приписывает» каждой прямо и косвенно измеряемой величине погрешность, вычисляемую с заданной доверительной вероятностью на основе многократных измерений величины в сопоставимых условиях.

При измерениях электрических параметров электропривода с целью диагностики ЭПА используют методики измерений, которые, как правило, завершаются расчетом рабочего тока и плавности хода. В рамках разработки ПК ОКМП были проведены многократные эксперименты с целью создания и аттестации методик в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009[4], ГОСТ Р 8.1015-2022[5]:

– методика диагностирования и тарировки электропривода ЭПА;

– методики измерения диагностических величин: силы тока и напряжения питающей сети, прямого измерения крутящего момента, косвенного измерения крутящего момента по электрическим сигналам.

Последовательность расчета крутящего момента показана на рисунке 6.

В таблице 1 приведены результаты измерения электрических параметров и крутящего момента электропривода типа Б на задвижке 30с941нж DN150 в составе экспериментального стенда ВИТИ НИЯУ МИФИ (см. рис. 6).

Далее проведена оценка погрешности расчетных и измеренных параметров в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011[6], ГОСТ Р 8.997-2021[7].

В таблице 2 приведен аналогичный набор параметров, полученной на задвижке DN125 с приводом ПЭМ типа А в составе учебного стенда АНО ДПО «Техническая академия Росатома» (рис. 7).

[4] ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200077909 (дата обращения: 10.07.2024)

[5] ГОСТ Р 8.1015-2022. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза нормативной и технической документации в области использования атомной энергии. Организация и основные требования к содержанию. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200194401 (дата обращения: 01.07.2024)

[6] ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200089016 (дата обращения: 13.07.2024).

[7] ГОСТ Р 8.997-2021. Государственная система обеспечения единства измерений. Алгоритмы оценки метрологических характеристик при аттестации методик измерений в области использования атомной энергии. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200179190 (дата обращения: 11.07.2024).

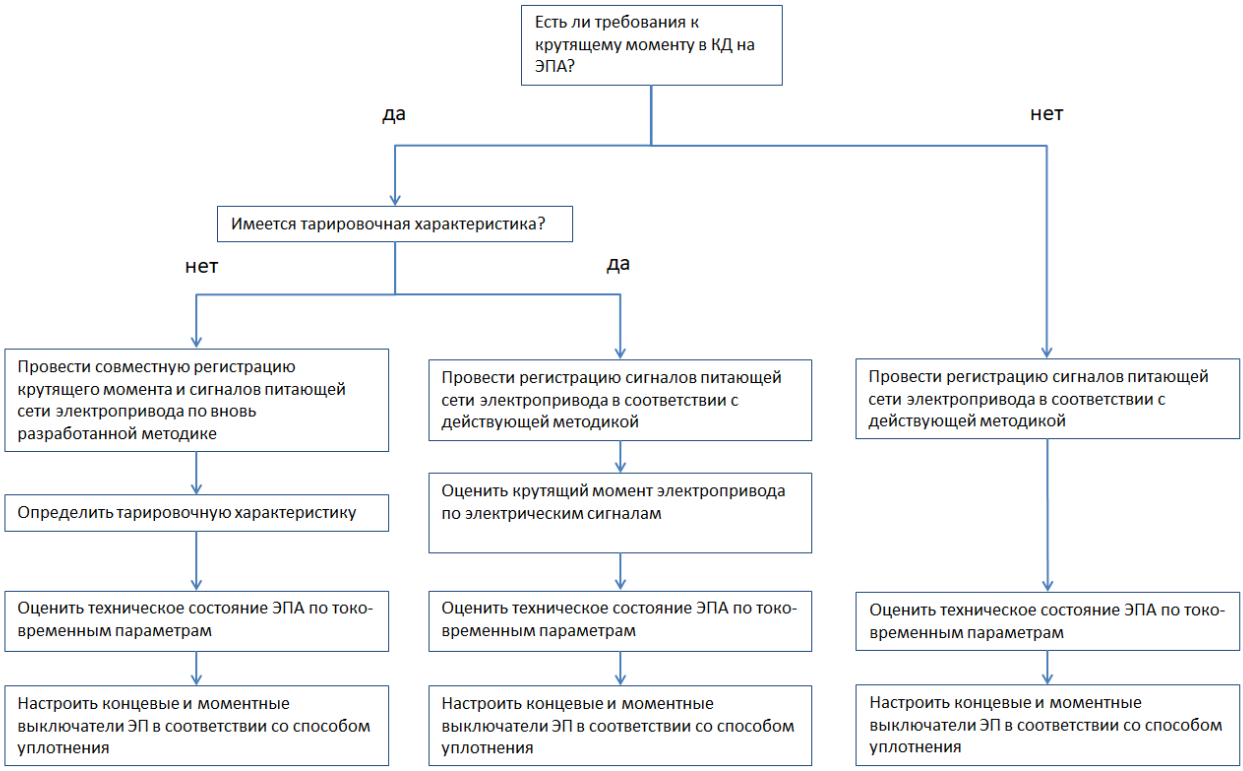


Рисунок 6. *Алгоритм расчета крутящего момента*
Figure 6. *Torque calculation algorithm*

Рисунок 7. *Измерения на стенде АНО ДПО «Техническая академия Росатома»*
Figure 7. *Rosatom Technical Academy bench measurements*

Для оценки технического состояния ЭПА по методикам[8] используют набор более чем из 30 параметров, являющихся результатом обработки исходных сигналов диагностических величин: сила тока, напряжение, крутящий момент. При этом процедура экспресс-анализа подразумевает оценку по ограниченному набору параметров, описанному ниже.

Для расчета диагностических параметров используют демодулирование сигналов – удаление из них гармоники сетевого напряжения (50 Гц) как не несущей диагностической информации. В данной работе для этого использовано взятие огибающей методом скользящего среднеквадратического значения, где периодом усреднения принят один период сетевой гармоники (1/50 секунды).

Огибающая сигнала X определяется по формуле (1):

$$RMS(X) = \sqrt{\frac{\sum_0^n X^2}{n}}, \quad (1)$$

где n – количество отсчетов величины.

Этой операции подвергаются сигналы силы тока по фазам A, B, C.

Рассчитывают сигнал мгновенных значений мощности по формуле (2):

$$P = U_A \times I_A + U_B \times I_B + U_C \times I_C, \quad (2)$$

[8] МТ 1.2.3.02.999.0085-2010 «Диагностирование трубопроводной арматуры. Методика», НИИ «Энергомашиностроения», 2010. 127 с.; МТ 1.2.1.15.1175-2016. Диагностирование трубопроводной электроприводной арматуры. Методика. АО «Концерн Росэнергоатом». Стандарт организации. Смоленск, 2016. 145 с.

где U_A, U_B, U_C – напряжения по фазам; I_A, I_B, I_C – силы тока по фазам, после чего его также подвергают демодуляции по формуле (1).

Выполняют ручную фрагментацию сигнала, то есть указывают на нем характерные участки рабочего цикла ЭПА. Пример такой фрагментации приведен на рисунке 8.

Определяют диагностические параметры. В качестве примера рассмотрены основные: рабочий ток и плавность хода.

Рабочий ток определяется как среднее значение огибающей тока рабочего хода после взятия огибающей сигнала.

Рабочая мощность определяется выражением (3):

$$P = U_{Amean} \times I_{Amean} + \\ + U_{Bmean} \times I_{Bmean} + U_{Cmean} \times I_{Cmean}, \quad (3)$$

где U_{Amean}, U_{Bmean}, U_{Cmean} – рабочие напряжения по фазам;

I_{Amean}, I_{Bmean}, I_{Cmean} – рабочие силы тока по фазам.

Плавность хода по току или мощности определяется формулой (4):

$$\gamma_X = 100\% \times (1 - \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{mean}}), \quad (4)$$

где X_{max}, X_{mean}, X_{min} – максимальные, средние, минимальные значения огибающей тока или мощности.

Крутящий момент на валу электропривода измеряется напрямую.

Результаты многократной тарировки исследуемых клиновых задвижек DN150 и DN125 сведены в таблицы 1 и 2. В качестве измеряемого результата рассматривается коэффициент связи $K_{св}$, имеющий физический смысл тангенса угла наклона тарировочной характеристики (рис. 5) и размерность Н·м/Вт.

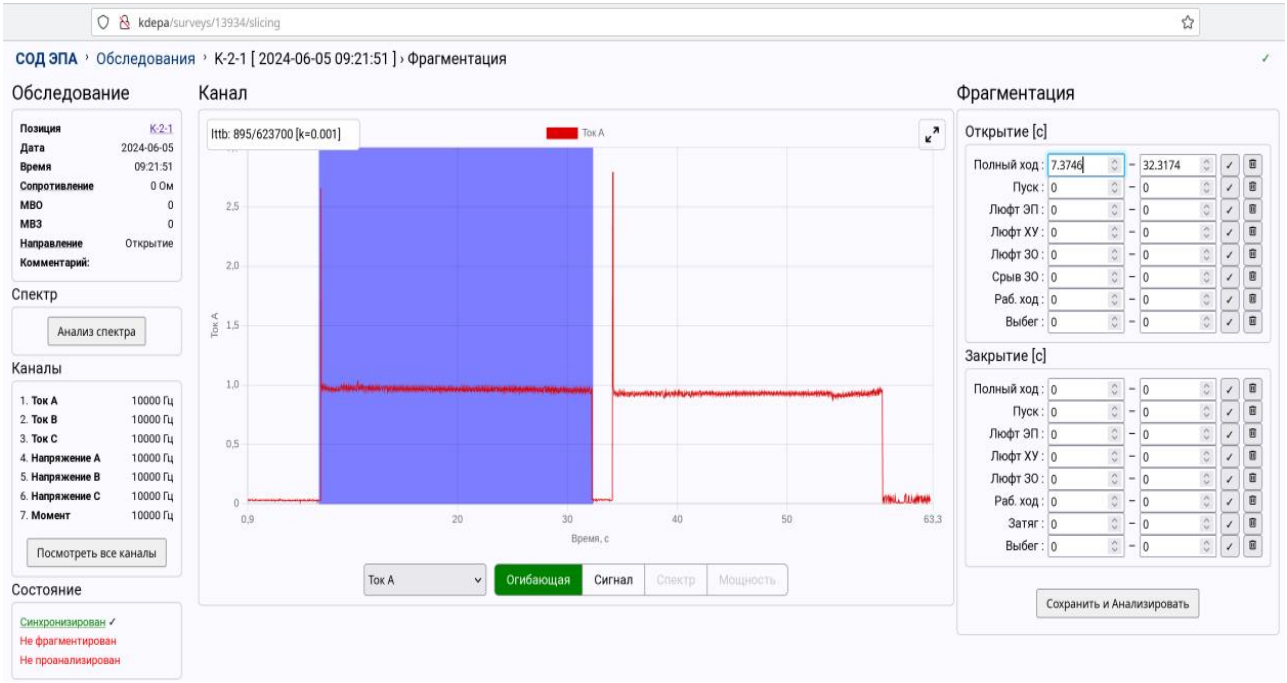


Рисунок 8. *Стационарный модуль ПК ОКМП. Фрагментация диагностического сигнала*
Figure 8. *Stationary module of multimedia training program. Diagnostic signal fragmentation*

Таблица 1. *Результаты анализа случайной погрешности при тарировке электропривода задвижки DN150*
Table 1. *Analysis results of random error during calibration of electric motor drive gate valve DN150*

Номер опыта	Коэффициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затяга ЭПА, Н·м	Номер опыта	Коэф-фициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затяга ЭПА, Н·м
1	0,147	228,9	9	0,166	214,9
2	0,147	228,9	10	0,171	210,9
3	0,149	222,9	11	0,168	211,9
4	0,148	226,9	12	0,155	213,9
5	0,156	217,9	13	0,164	213,9
6	0,148	226,9	14	0,167	208,9

Номер опыта	Коэффициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затяга ЭПА, Н·м	Номер опыта	Коэф-фициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затяга ЭПА, Н·м
7	0,155	216,9	15	0,169	210,9
8	0,156	217,9	16	0,153	212,9
Результаты обобщения					
Величина			Коэффициент связи		Расчетный крутящий момент затяга ЭПА
Математическое ожидание			0,157 Н·м/Вт		217,8 Н·м
Стандартное отклонение			0,008 Н·м/Вт		6,88 Н·м
Относительная погрешность (коэффициент вариации)			5,3 %		3,2 %

Таблица 2. *Результаты анализа случайной погрешности при тарировке электропривода задвижки DN125*
Table 2. *Analysis results of random error during calibration of electric motor drive gate valve DN125*

Номер опыта	Коэффициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затяга ЭПА, Н·м	Номер опыта	Коэффициент связи, Н·м/Вт	Расчетный крутящий момент затяга ЭПА, Н·м
1	0,621	46,675	9	0,700	50,875
2	0,602	42,075	10	0,666	46,175
3	0,573	48,975	11	0,629	52,375
4	0,637	48,275	12	0,592	45,175
5	0,629	48,175	13	0,657	51,275
6	0,624	48,375	14	0,620	50,075
7	0,631	46,375	15	0,564	52,875
8	0,700	50,875	16	0,600	51,175
Результаты обобщения					
Величина			Коэффициент связи		Расчетный крутящий момент затяга ЭПА
Математическое ожидание			0,623 Н·м/Вт		48,6 Н·м
Стандартное отклонение			0,035 Н·м/Вт		2,96 Н·м
Относительная погрешность (коэффициент вариации)			5,6 %		6,1 %

Испытания в целях утверждения типа средства измерения показали, что погрешность измерения крутящего момента ПК ОКМП не превышает 0,6-0,8 Н·м. Таким образом, общая погрешность тарировки может быть определена как суперпозиция погрешности снятия тарировочной характеристики и погрешности расчета по ней крутящего момента.

Итоговая погрешность составила не более 6,5 % от действующей величины момента затяга. Учитывая требование НП-068-05[9] по 10%-й точности срабатывания ОКМП привода, результаты тарировки могут считаться достоверными и корректно описывать техническое состояние и правильность настройки блока выключателей электропривода арматуры АЭС.

Для оценки влияния на неопределенность самой процедуры тарировки выполнены множественные измерения электрических параметров на той же арматуре (DN125, стенд АНО ДПО «Техническая академия Росатома») без установленного датчика крутящего момента. Результаты сопоставления приведены в таблице 3. Различие между выборками определено как возможность их объединения по критерию Стьюдента [7].

Для параметров, по которым результаты измерения с датчиком крутящего момента (ДКМ) и без него неоднородны, проведено сопоставление расхождения результатов и погрешности их измерения. Результат приведен в таблице 4.

Результаты показали, что оснастка для измерения крутящего момента по месту эксплуатации ЭПА влияет только на время выбега двигателя, увеличивая его приблизительно на 10%. Прочие параметры, полученные в процессе тарировки привода,

[9] НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования. – Режим доступа: http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/НП-068-05%20Трубопроводная%20арматура%20для%20атомных%20станций.%20Общие%20технические%20требования_Текст.pdf (дата обращения: 08.07.2024).

могут быть использованы для оперативной диагностики, поскольку на них наличие или отсутствие оснастки с ДКМ не влияет.

Таблица 3. *Влияние датчика крутящего момента на замеренные параметры ЭПА*
Table 3. *Influence of the torque sensor on the motor operated valves measured parameters*

Параметр	Значение без установленного датчика крутящего момента	Значение с установленным датчиком крутящего момента	Объединение выборок с доверительной вероятностью 95% , $t_{кр}$ = 2,045
Закрытие			
Рабочий ток, фаза А, А	0,9294 ± 0,004453	0,9301 ± 0,004011	t = 0,485 Допустимо
Рабочий ток, фаза В, А	0,8391 ± 0,01664	0,8373 ± 0,005228	t = 0,398 Допустимо
Рабочий ток, фаза С, А	0,9529 ± 0,006937	0,9591 ± 0,005701	t = 2,660 Недопустимо
Рабочая мощность, Вт	339,8 ± 2,267	328,05 ± 4,338	t = 9,304 Недопустимо
Ток затяга, фаза А, А	0,9892 ± 0,01054	0,9950 ± 0,004231	t = 1,980 Допустимо
Ток затяга, фаза В, А	0,8956 ± 0,02077	0,89775 ± 0,005635	t = 0,395 Допустимо
Ток затяга, фаза С, А	1,0150 ± 0,02171	1,0223 ± 0,007284	t = 1,236 Допустимо
Мощность затяга, Вт	419,1 ± 22,76	400,2 ± 3,647	t = 3,183 Недопустимо
Плавность хода по току, фаза А, %	95,061 ± 0,8270	94,27 ± 0,6104	t = 2,981 Недопустимо
Плавность хода по току, фаза В, %	94,19 ± 0,9270	93,48 ± 0,3835	t = 2,756 Недопустимо
Плавность хода по току, фаза С, %	94,86 ± 1,0782	94,25 ± 0,7762	t = 1,790 Допустимо
Плавность хода по мощности, %	87,63 ± 1,186	88,73 ± 0,8916	t = 2,867 Недопустимо
Время выбега двигателя, с	0,08567 ± 0,01011	0,09427 ± 0,00475	t = 2,983 Недопустимо
Открытие			
Рабочий ток, фаза А, А	0,9606 ± 0,004838	0,9688 ± 0,006666	t = 3,886 Недопустимо
Рабочий ток, фаза В, А	0,8498 ± 0,005522	0,8514± 0,004387	t = 0,892 Допустимо
Рабочий ток, фаза С, А	0,9461 ± 0,004914	0,9477 ± 0,008979	t = 0,620 Допустимо
Рабочая мощность, Вт	343,9 ± 1,979	338,2 ± 2,377	t = 7,22 Недопустимо
Ток срыва, фаза А, А	1,0295 ± 0,0004151	1,0316 ± 0,009417	t = 0,373 Допустимо
Ток срыва, фаза В, А	0,9179 ± 0,02192	0,91567 ± 0,008034	t = 0,385 Допустимо
Ток срыва, фаза С, А	1,0216 ± 0,02672	1,0191± 0,008781	t = 0,354 Допустимо
Мощность срыва, Вт	442,092 ± 32,91	431,5 ± 9,347	t = 1,234 Допустимо
Плавность хода по току, фаза А, %	92,44 ± 0,8273	92,24± 0,5623	t = 3,471 Недопустимо
Плавность хода по току, фаза В, %	91,88 ± 0,9964	91,44 ± 0,7432	t = 1,420 Допустимо
Плавность хода по току, фаза С, %	93,088 ± 0,8611	92,91 ± 1,367	t = 0,435 Допустимо
Плавность хода по мощности, %	83,42 ± 1,0701	83,11 ± 1,271	t = 0,720 Допустимо

Параметр	Значение без установленного датчика крутящего момента	Значение с установленным датчиком крутящего момента	Объединение выборок с доверительной вероятностью 95% , $t_{кр}$ = 2,045
Время выборки люфтов при открытии, с	1,502 ± 0,031	1,501 ± 0,017	t = 0,194 Допустимо

Таблица 4. *Сопоставление расхождения результатов измерений с погрешностью*
Table 4. *Comparison of the difference between the measurement results and the uncertainty*

Параметр	Абсолютная разность мат. ожиданий при измерениях с ДКМ и без ДКМ	Относительная разность мат. ожиданий при измерениях с ДКМ и без ДКМ	Относительная погрешность прямого или косвенного измерения	Значимость расхождения
Закрытие				
Рабочий ток, фаза С	0,0008 А	0,081 %	2,5 %	Незначимо
Рабочая мощность	11,76 Вт	3,460 %	4,75 %	Незначимо
Мощность затяга	18,94 Вт	4,519 %	4,75 %	Незначимо
Плавность хода по току, фаза А	0,791 %	0,832 %	4,33 %	Незначимо
Плавность хода по току, фаза В	0,714 %	0,758 %	4,33 %	Незначимо
Плавность хода по мощности	1,098 %	1,253 %	8,23 %	Незначимо
Время выбега двигателя	0,00861 с	10,0467 %	5,84 %	Значимо
Открытие				
Рабочий ток, фаза А	0,00818 А	0,851 %	2,5 %	Незначимо
Рабочая мощность	5,69 Вт	1,66 %	4,75 %	Незначимо
Плавность хода по току, фаза А	0,877 %	0,942 %	4,33 %	Незначимо

Заключение

Показана принципиальная техническая возможность проведения тарировки электропривода по месту его эксплуатации, совмещенной с оперативной технической диагностикой по электрическим сигналам. Разработан переносной диагностический комплекс для решения этих задач.

Впервые выполнена оценка неопределенности и разработаны методики измерения косвенно определяемых диагностических параметров, включая момент затяга ЭПА. На экспериментальных образцах показано, что погрешность тарировки укладывается в нормы НП-068-05, а влияние оснастки и датчиков, применяемых при тарировке, на диагностические параметры малозначимо, за исключением времени выбега привода.

В результате внедрения результатов НИОКР специализированные подразделения атомных станций АО «Концерн Росэнергоатом» получат новые возможности по контролю технического состояния ЭПА. Опытная эксплуатация разработанного комплекса пройдет на Нововоронежской АЭС, после этого разработка может быть применена на других АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Мозжечков В.А., Холматов А.З. Автоматическое управление моментом силы уплотнения электроприводной трубопроводной арматуры. *Известия тульского государственного университета. Технические науки.*

2015;9:185–190. Режим доступа: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2015_09&year=2015 (дата обращения: 03.07.2024).

Mozzhechkov V.A., Kholmatov A.Z. Automatic control of the moment of compaction force of electric drive pipe fittings. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2015;9:185–190. (In Russ.). Available at: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/preview_therest_ru.php?x=tsu_izv_technical_sciences_2015_09&year=2015 (accessed: 03.07.2024).

2. Подрезова И.С., Шутова Л.В., Ульянова Ю.Е., Пугачева О.Ю., Елжов Ю.Н. Анализ причин заклинивания и обрывов штоков трубопроводной электроприводной арматуры. *Глобальная ядерная безопасность*. 2014;4(13):32–37. Режим доступа: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2014.4-5.pdf (дата обращения: 04.07.2024).

Podrezova I.S., Shutova L.V., Ulyanova Yu.E., Pugacheva O.Yu., Elzhov Yu.N. Analysis of the causes of jamming and breakage of rods of pipeline electric valves. *Global nuclear safety*. 2014;4(13):32–37. (In Russ.). Available at: http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2014.4-5.pdf (accessed: 04.07.2024).

3. Фридберг Э.И., Сердюк А.В., Пинаева Е.Г., Завьялова М.И., Тарасьев Ю.И. Диагностическое обеспечение электроприводной арматуры АЭС. *Тяжелое машиностроение*. 2008;11:33–35. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=jvzhcz&ysclid=m3zkzl69y295947965 (дата обращения: 04.07.2024).

Friedberg E.I., Serdyuk A.V., Pinaeva E.G., Zavyalova M.I., Tarasyev Yu.I. Diagnostic support for electric drive valves of nuclear power plants. *Heavy engineering*. 2008;11:33–35. (In Russ.). Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=jvzhcz&ysclid=m3zkzl69y295947965 (accessed: 04.07.2024).

4. Лапкис А.А., Швец Д.В., Абидова Е.А., Дембицкий А.Е. Расчетный метод контроля состояния электропривода запорной арматуры. *Автоматизация в промышленности*. 2022;1:45–50. Режим доступа: https://avtprom.ru/system/files/DOI/2022/1/10._lapkis.pdf (дата обращения: 07.07.2024).

Lapkis A.A., Shvets D.V., Abidova E.A., Dembitsky A.E. Calculation method for monitoring the condition of the electric actuator of shut-off valves. *Automation in industry*. 2022;1:45–50. (In Russ.). Available at: https://avtprom.ru/system/files/DOI/2022/1/10._lapkis.pdf (accessed: 07.07.2024).

5. Мозжечков В.А., Савин А.С. Диагностика электроприводной трубопроводной арматуры с использованием датчика момента в составе червяного редуктора интеллектуального привода. *Автоматизация в промышленности*. 2011;11:38–41. Режим доступа: https://avtprom.ru/article/diagnostika-elektroprivodnoi-tru (дата обращения: 06.07.2024).

Mozzhechkov V.A., Savin A.S. Diagnostics of electric drive pipe fittings using a torque sensor as part of a worm gear of an intelligent drive. *Automation in industry*. 2011;11:38–41. (In Russ.). Available at: https://avtprom.ru/article/diagnostika-elektroprivodnoi-tru (accessed: 06.07.2024).

6. Орлов А.И. О проверке однородности двух независимых выборок. *Заводская лаборатория*. 2003;69(1):55–60. Режим доступа: https://www.analystsoft.com/ru/products/statplus/lib/homogen_check.php (дата обращения: 09.07.2024).

Orlov A.I. On checking the uniformity of two independent samples. *Factory laboratory*. 2003;69(1):55–60. (In Russ.). Available at: https://www.analystsoft.com/ru/products/statplus/lib/homogen_check.php (accessed: 09.07.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Лапкис А.А. – разработка концепции исследования, методических основ исследования метрологических характеристик комплекса, постановка эксперимента;

Цыхлер Л.В. – выполнение экспериментальных работ, обработка результатов;

Никифоров В.Н. – разработка технологии применения комплекса для тарировки трубопроводной арматуры, анализ нормативной базы атомной отрасли;

Егорова В.П. – применение методов математической статистики, метрологической нормативно-технической документации, разработка методик измерения.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Lapkis A.A. – development of the research concept, methodological foundations for the study of the metrological characteristics of the complex, setting up an experiment;

Tsykhler L.V. – execution of experimental work, processing of results;

Nikiforov V.N. – development of technology for the application of a complex for calibration of pipeline fittings, analysis of the regulatory framework of the nuclear industry;

Egorova V.P. – application of methods of mathematical statistics, metrological normative and technical documentation, development of measurement methods.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:
Работа выполнена без дополнительных источников финансирования

FUNDING:
No additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:
No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Александр Аркадьевич Лапкис, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский 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.
https://orcid.org/0000-0002-9431-7046
e-mail: AALapkis@mephi.ru
Лев Вадимович Цыхлер, лаборант-исследователь, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
https://orcid.org/0009-0006-2977-1572
e-mail: lev.tsyhler@yandex.ru
Виктор Николаевич Никифоров, кандидат технических наук, директор, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
https://orcid.org/0009-0006-9508-9344
e-mail: nii_energomash@mail.ru
Вера Петровна Егорова, главный специалист, НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
https://orcid.org/0009-0007-2101-4910
e-mail: ryabesnya@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Aleksandr A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk 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.
https://orcid.org/0000-0002-9431-7046
e-mail: AALapkis@mephi.ru

Lev V. Tsykhler, Laboratory Researcher, SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
https://orcid.org/0009-0006-2977-1572
e-mail: lev.tsyhler@yandex.ru

Viktor N. Nikiforov, Cand. Sci. (Eng.), SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
https://orcid.org/0009-0006-9508-9344
e-mail: nii_energomash@mail.ru

Vera P. Egorova, Senior specialist, SRI NPE, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
https://orcid.org/0009-0007-2101-4910
e-mail: ryabesnya@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 21.08.2024
После доработки / Revised 11.12.2024
Принята к публикации / Accepted 17.12.2024

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

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

УДК 332.156 : 621.039
https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-09
EDN ZEIZNM
Оригинальная статья / Original paper

Перспективы развития атомграда под влиянием агломерационных процессов на территории присутствия ГК «Росатом»

В.А. Руденко[1], И.А. Ухалина[1] ✉, А.В. Анцибор[1], Н.А. Ефименко[1], М.В. Головко[2]

[1]*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация*
[2]*Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, г. Краснодар, Российская Федерация*
✉*IAUkhalina@mephi.ru*

Аннотация. Устойчивое развитие экономики, основанное на технологической независимости и технологическом лидерстве, в большей степени реализуется в реальном секторе. Одну из лидирующих позиций на мировом рынке занимает атомная энергетика России. Предприятия реального сектора экономики атомной отрасли расположены в городах присутствия объектов ГК «Росатом». Концентрация ресурсного потенциала и его эффективное освоение требует кадрового обеспечения, а это в значительной степени зависит от предоставленных территорией условий проживания, качества жизни. Создание комфортной городской среды для развития атомградов требует притока существенных инвестиций. В данной статье рассматриваются особенности, проблемы и перспективы развития одного из 29 атомградов, города Волгодонска, в условиях протекания агломерационных процессов, формирования новой Волгодонской агломерации.

Ключевые слова: атомград, ГК «Росатом», агломерация, агломерационное ядро, агломерационное развитие, межмуниципальное сотрудничество, пространственное развитие территорий, инвестиции, финансово-инвестиционный механизм.

Для цитирования: Руденко В.А., Ухалина И.А., Анцибор А.В., Ефименко Н.А., Головко М.В. Перспективы развития атомграда под влиянием агломерационных процессов на территории присутствия ГК «Росатом». *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):91–100. https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-09

For citation: Rudenko V.A., Ukhalina I.A., Antsibor A.V., Efimenko N.A., Golovko M.V. Prospects of atom city development under the influence of agglomeration processes in the territory of Rosatom's presence. *Global nuclear safety.* 2024;14(4):91–100. (In Rus.). https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-09

Prospects of atom city development under the influence of agglomeration processes in the territory of Rosatom's presence

Valentina A. Rudenko[1], Irina A. Ukhalina[1] ✉, Anna V. Antsibor[1], Nina A. Efimenko[41], Maria V. Golovko[2]

[1]*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*
[2]*I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*
✉*IAUkhalina@mephi.ru*

Abstract. Sustainable economic development based on technological independence and technological leadership is largely realized in the real sector. One of the leading positions in the world market is occupied by the nuclear energy of

© Руденко В.А., Ухалина И.А., Анцибор А.В., Ефименко Н.А., Головко М.В., 2024

Russia. Enterprises of the real sector of the nuclear industry economy are located in the cities where Rosatom State Corporation facilities are present. Concentration of resource potential and its effective development requires personnel provision, and it largely depends on the living conditions and quality of life provided by the territory. Creating a comfortable urban environment for the development of atomic cities requires an influx of significant investments. This article discusses the features, problems and prospects for the development of one of the 29 atomic cities, the city of Volgodonsk, in the context of agglomeration processes and the formation of a new Volgodonsk agglomeration.

Keywords. Atom city, Rosatom State Corporation, agglomeration, agglomeration core, agglomeration development, inter-municipal cooperation, spatial development of territories, investments, financial and investment mechanism.

Введение

Санкционное давление на российскую экономику сопровождается усилением кризисных процессов в ряде отраслей. В данной ситуации еще более актуальной становится трансформация экономического развития, основанная на технологической независимости и технологическом лидерстве. Одной из отраслей промышленности России, занимающей лидирующие позиции на мировом рынке, является атомная энергетика. Передовые технологии атомной отрасли в основном реализуются на предприятиях ГК «Росатом» расположенных в атомных городах или атомградах. Предприятия госкорпорации являются точками опережающего развития атомградов. Их обеспечение ресурсами, в том числе и высококвалифицированными кадрами, создание конкурентных комфортных условий проживания, становится приоритетной задачей для территорий присутствия ГК «Росатом». [1]

Возникновение атомградов берет свое начало с середины 20-х годов прошлого столетия вместе с реализацией советского атомного проекта (1945-1953 гг.). Число городов присутствия предприятий ГК «Росатом» в РФ на сегодня составляет 29, включая г. Энергодар, объявленный территорией присутствия объектов госкорпорации осенью 2022 года. Практически в половине атомных городов, а именно в 14 из 29, другие крупные предприятия отсутствуют [2].

Уникальность, проблемы и перспективы развития атомграда-Волгодонска

Уникальность Волгодонска заключается в том, что он является единственным городом, на территории которого расположены предприятия четырех дивизионов ГК «Росатом»: от производства оборудования для атомных станций, монтажа и наладки, до непосредственной эксплуатации и поддержания его работоспособности. Кроме того, в июле 2016 г. был создан Волгодонский промышленный кластер атомного машиностроения, объединяющий 18 организаций города.

Волгодонск является локомотивом индустриального развития восточной части региона, энергетическим центром Юга России, «Атомградом XXI века», представленный 4 дивизионами ГК «Росатом», имеет высокий демографический потенциал, геостратегическое положение между двумя городами-миллионниками (Ростов-на-Дону и Волгоград), связан водными путями с пятью морями (Белое, Балтийское, Каспийское, Азовское, Черное), имеет железнодорожные и автотранспортные коридоры.

Экономический потенциал Волгодонска заключается в развитой инновационной промышленности: энергетика (филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонская ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, Цимлянская ГЭС), машиностроение (филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, АО «Атоммашэкспорт», ООО «Полесье», ООО «МТМ»), химическая промышленность (ОАО ВХЗ «Кристалл», ООО НПО «НИИПАВ»), деревообрабатывающая промышленность (ООО «Алмаз», ОАО «ВКДП»), пищевая и перерабатывающая промышленность (ООО «Донские биотехнологии», ООО «Ванта», ООО «Волга-Дон рыба» и др., более 20 предприятий).

Волгодонск вносит свой вклад в развитие Ростовской области во многих сферах жизнедеятельности. В 2023 г. за счет Волгодонска объем производства электроэнергии составил более 60 %, объем отгруженной продукции 162,2 млрд. руб., введено в действие жилых домов общей площадью 42,3 тыс. кв. м, инвестиции в основной капи-

тал по крупным и средним предприятиям, 11 млрд. руб., оборот розничной торговли по всем каналам реализации составил 60,4 млрд. руб. Также в Волгодонске располагаются федеральные и региональные контрольно-надзорные органы, которые обслуживают население близлежащих районов.

Фактически Волгодонск выполняет функции агломерационного ядра, выступая центром крупной агломерации на востоке Ростовской области, но официально такого статуса территория не имеет [3].

В настоящее время нет единого понимания термина «городская агломерация». В частности выделяют четыре подхода: экономический, географический, управленческий и градостроительный. В целях максимального сокращения расходов и отрицательных сетевых эффектов экономический подход предполагает обоснование необходимости кластеризации экономической деятельности производственных фирм. Географический подход в понимании термина «городская агломерация» отражает расположенные недалеко друг от друга на небольшой территории городские и сельские поселения, имеющие разнообразные и интенсивные связи. С точки зрения управленческого подхода, агломерация – это скоординированная форма управления ее элементами для решения общих задач. Комплексный градостроительный подход объединяет в себе экономические, географические, социальные и другие факторы, определяющие формирование групповых форм расселения населения [4].

В областном законе Ростовской области от 29.06.2022 № 704-ЗС «О развитии агломераций в Ростовской области» под агломерацией понимается территория, включающая городской округ и соседние с ним муниципальные образования («территория, включающая территорию либо часть территории городского округа и территории либо части территорий имеющих с ним общие границы иных муниципальных образований»), которые могут быть объединены для усиления интенсивности хозяйственных, трудовых, транспортных, научно-образовательных, культурно-бытовых, рекреационных и иных связей[1].

Наличие общих границ с Волгодонском позволяет рассматривать в составе Волгодонской агломерации четыре прилегающие района – Волгодонской, Дубовский, Зимовниковский и Цимлянский (рис. 1).

Волгодонская агломерация является уравновешивающим плечом Ростовской агломерации на востоке области. Ресурсами и возможностями социально-культурных, медицинских, образовательных и других инфраструктурных объектов города фактически пользуются жители не только Волгодонска, но и население 11 соседних районов области. Численность населения Волгодонска и 11 районов (Волгодонской, Дубовский, Зимовниковский, Константиновский, Мартыновский, Ремонтненский, Семикаракорский, Цимлянский, Заветинский, Орловский, Пролетарский) составляет 496,7 тыс. чел., это 11,9 % от численности населения Ростовской области. Общая площадь 12 муниципальных образований – 33267,74 кв. км, что занимает 33 % от площади Ростовской области.

Волгодонск является центром оказания медицинской помощи на востоке региона. Население города и районов получают медицинскую помощь как в стационаре, так и амбулаторно. В городе находится 3 городские больницы, включая детскую городскую больницу и 4 диспансера, 2 медсанчасти, 4 поликлиники, Центр микрохирургии глаза «Сокол», Гемодиализный центр, Станция переливания крови. Кроме того, специализированную медицинскую помощь населению города и районов оказывают более 10 частных медицинских центров (Флебомед, Аира, СМД МРТ-шка, КДЛ и др.).

Однако фактически границы межмуниципального сотрудничества г. Волгодонска и районов значительно шире (рис. 2).

[1] О развитии агломераций в Ростовской области. Областной закон Ростовской области от 29.06.2022 № 704-ЗС. Режим доступа: https://pravo.donland.ru/doc/view/id/%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B9+%D0%B7%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_704-%D0%97%D0%A1_30062022_31477/page/1/ (дата обращения: 15.05.2024).

Рисунок 1. *Волгодонская агломерация (проект)*
Figure 1. *Volgodonsk agglomeration (project)*

Рисунок 2. *Волгодонская агломерация (фактически сложившиеся границы)*
Figure 2. *Volgodonsk agglomeration (actual boundaries)*

Научно-образовательный потенциал города состоит в том, что на территории Волгодонска расположен филиал опорного вуза ГК «Росатом» Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ (ВИТИ НИЯУ МИФИ), а также имеется 8 учреждений среднего профессионального образования. В связи с этим Волгодонск является и образовательным центром на востоке области, что позволяет обеспечить квалифицированными кадрами, как предприятия корпорации, так и предпри-

ятия-партнеры ГК «Росатом», расположенные на территории города [5].

Однако, имея высокую экономическую и социальную значимость для Ростовской области, Волгодонск находится в достаточно сложном положении и имеет ряд проблем:

1. Аварийное состояние городских инженерных сетей (водоснабжение, канализация).

Средний износ системы водопроводных и канализационных сетей составляет более 80 %, что приводит к большой потере объемов воды и убыткам для МУП «Водоканал» г. Волгодонска. С целью изыскания денежных средств для проведения ремонтных работ в 2024 году запланировано введение новых тарифов на холодную воду и водоотведение. Рост тарифа на питьевую воду составит более чем 50 %, на техническую воду – 225,3 %, на водоотведение – 68 %. При этом фактические тарифы для населения будут скорректированы с учетом компенсаций из бюджета Ростовской области, однако компенсаций за техническую воду не предусмотрено, что приведет к значительному повышению статей расходов предприятий.

2. Изношенность автомобильных дорог.

Доля протяженности автомобильных дорог общего пользования местного значения, не отвечающих нормативным требованиям, в общей протяженности автомобильных дорог общего пользования местного значения за 2023 год составила 41,7 %. Ежегодно в городе осуществляется ямочный ремонт дорожного покрытия, на который выделяются значительные средства, однако состояние автомобильных дорог только ухудшается.

3. Возрастающий миграционный отток населения, в особенности молодежи.

С 2019 г. в Волгодонске наблюдается возрастающий миграционный отток. Если в 2019 г. в результате миграции из города выбыло всего 60 человек, то в 2022 г. – 1044 чел., в 2023 – 786 чел. И это только официальная статистика, многие жители, в основном молодежь, уезжают (оставаясь зарегистрированными в г. Волгодонске) в крупные города, где есть не только работа, но и больше возможностей для всестороннего развития личности, семьи, детей.

4. Недостаток кадров на производстве, в образовании, медицине.

По итогам 2023 г. в Волгодонске вырос кадровый дефицит, на рынке труда дисбаланс спроса и предложения на рабочую силу продолжает расширяться, потребность в кадрах в 2023 году выросла на 43 %. Востребованы на рынке труда не только рабочие профессии, наблюдается также дефицит инженеров, медицинских работников, учителей. Укомплектованность государственных медицинских учреждений врачами составляет всего 30 %, средним медицинским персоналом – 40 %. Учреждения медицины в настоящее время имеют современное оборудование, которое в полной мере не может быть использовано из-за нехватки кадров. В школах Волгодонска и близлежащих районов также наблюдается кадровый голод, доля учителей пенсионного возраста составляет более 30 %.

5. Отсутствие комфортной городской среды.

Современные условия экономического развития диктуют жесткие условия конкуренции между городами за квалифицированные кадры. Одним из ключевых факторов привлечения активного населения является формирование и развитие комфортной городской среды, обеспечение достойных условий жизни населения, наличие современных, эстетически привлекательных зон отдыха. Наличие образовательных учреждений среднего профессионального и высшего образования позволяет обеспечивать рабочими и молодыми специалистами предприятия не только атомной энергетики, но и машиностроительного кластера, строительной отрасли и других сфер экономики города.

Только ВИТИ НИЯУ МИФИ ежегодно обеспечивает предприятия молодыми специалистами по таким направлениям как «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», «Ядерная энергетика и теплофизика», «Машиностроение», «Теплоэнергетика и теплотехника», «Строительство», «Информационные системы и технологии», «Экономика» [6]. Однако «удержать» молодых специалистов атомград не в силах, не выдерживая конкуренцию по

условиям комфортного проживания и комфортной городской среды.

Создание комфортной городской среды – важное конкурентное преимущество, фактор привлечения активной молодежи, квалифицированных кадров и инвестиций [7].

Основной проблемой для Волгодонска является недостаток финансовых средств, что снижает возможности развития атомграда. Обязательным условием для участия в реализации крупных проектов по развитию города является 30 % софинансирования со стороны муниципального бюджета, а средства городского бюджета ограничены и недостаточны. Причиной дефицита средств местного бюджета стали как снижение прямых налоговых поступлений, так и поступлений из областного бюджета.

Отсутствие статуса агломерации не позволяет привлечь в регион дополнительное финансирование и внимание к вопросам социальной направленности, жилищно-коммунального хозяйства, дорожной деятельности, градостроительства, архитектурного планирования [8]. Получение городом статуса агломерации позволило бы субсидировать процентную ставку по жилищным кредитам и предоставлять ипотеку под 1 %-годовых молодым специалистам, которые с отличием окончили вуз в любом регионе России и приняли решение жить и работать в Ростовской области.

Также статус агломерации позволит направлять средства, предусмотренные нацпроектом «Безопасные и качественные автодороги», в том числе и на ремонт местных и региональных дорог, входящих в состав Волгодонской агломерации.

В свою очередь изменения в налоговом законодательстве (отмена поступлений налога на прибыль в местный бюджет, снижение кадастровой стоимости земельных участков отдельных видов земель, снижение норматива отчислений в муниципальный бюджет по НДФЛ и УСН) привели к тому, что несмотря на существенный рост объемов производства (более чем в 4,7 раза в 2023 г. по отношению к 2010 г.), темп прироста налоговых отчислений в городской бюджет за этот же период составил 146,1 %, то есть рост менее чем в 1,5 раза (рис. 3).

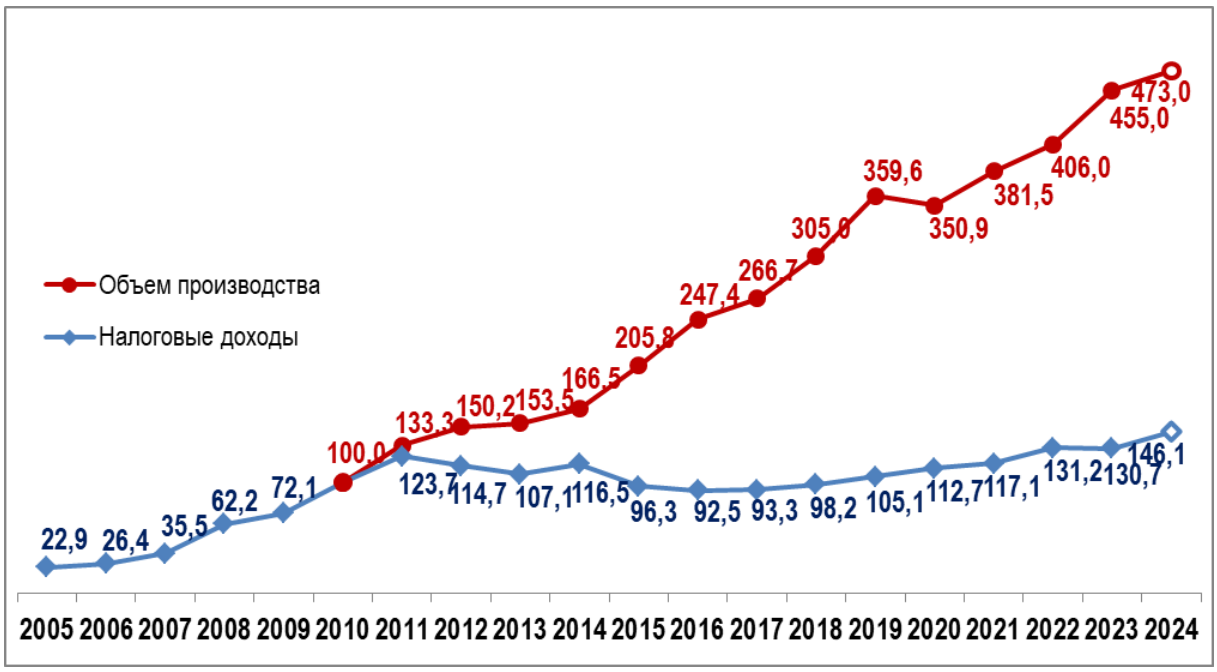


Рисунок 3. *Динамика производства и налоговых отчислений по г. Волгодонску (в % к 2010 г.) [9]*
Figure 3. *Dynamics of production and tax deductions in Volgodonsk (in % to 2010) [9]*

С целью поддержания городов присутствия ГК «Росатом» в 2015 г. было заключено «Соглашение о сотрудничестве Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» и Правительства Ростовской области». Средства от дополнительных нало-

гов корпорации, направляемые в регион, распределяются между муниципалитетами области. Несмотря на то, что именно Волгодонск является непосредственно территорией расположения Ростовской АЭС, предприятий атомного машиностроения (Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск), предприятий ветроэнергетики (АО «НоваВинд»), городу направляется незначительная часть от дополнительных налоговых отчислений ГК «Росатом» в регион. В таблице 1 представлена динамика дополнительных налоговых поступлений корпорации за период с 2016 по 2024 гг. в регион, и величина отчислений из области непосредственно территории присутствия предприятий ГК «Росатом» – в город Волгодонск.

Таблица 1. *Динамика налоговых отчислений*
Table 1. *Dynamics of tax payments*

Показатели по годам	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024 (проект)
Дополнительные налоги, направленные ГК «Росатом» в регион (Ростовская область), млн. руб.	4080	3547	5377	6220	9242	6211	5292	9200	9200
Дополнительные налоги, направ-ленные регионами в муниципальное образование г. Волгодонск, млн. руб.	204,3	106,3	115,9	171,1	243,3	306,2	850,7	420,0	307,0

Дополнительные налоги, направленные ГК «Росатом» в Ростовскую область в 2023 г. составили более 9 млрд. рублей. Из этих средств дополнительные налоги, направленные регионом в муниципальное образование город Волгодонск, составили 420 млн. руб. или 4,6 %. В рамках Соглашения между Росатомом и Ростовской областью, в 2024 г. Волгодонску будут выделены средства на общую сумму 307 млн. руб., что почти на 27 % меньше, по сравнению с 2023 годом. При неуклонном росте отчислений в региональный бюджет Волгодонск получает недостаточно средств для устойчивого развития и формирования комфортной городской среды.

Заключение

Приоритетные цели создания Волгодонской агломерации и развития атомграда, а также принципы их реализации:

– эффективное использование трудовых, материальных и финансовых ресурсов;

– реализация принципа государственно-частного партнерства;

– обеспечение устойчивого экономического роста, стимулирование развития конкурентного производства;

– преодоление рисков и кризисов, которые могут оказать сдерживающее развитие и ограничить реализацию потенциальных возможностей города Волгодонска;

– формирование комплексного подхода к решению демографических, социальных и экономических вопросов;

– формирование условий и стимулов для развития человеческого капитала на основе повышения эффективности и конкурентоспособности здравоохранения, образования, жилищного строительства и коммунальной инфраструктуры.

Анализируя возможности атомграда, как ядра новой агломерации, можно выделить следующие точки роста:

Трансфер технологий ГК «РОСАТОМ»:

– ИИ и цифровые решения в промышленности;

– возобновляемая и «умная» энергетика;

– системы развития умных и энергоэффективных городов;

– цифровая и ядерная медицина.

Кластер биотехнологий:

– крупнейший биотех-кластер на юге страны;

– создание инновационного предприятия по глубокой переработке зерна;

– создание сопутствующих производств;

– 1000 рабочих мест.

Город для образования (stem-град). Ориентация городских процессов, образовательных программ на:

– науку;

– инжиниринг;

– технологии.

Достижение поставленных целей потребует существенных инвестиций, а значит корректировки финансово-инвестиционного механизма используемого при финансировании города Волгодонска. Инвестиции в объекты промышленной, инженерной, энергетической, коммунальной, транспортной, социальной инфраструктуры будут содействовать формированию благоприятной среды для бизнеса. Развитие и внедрение в производство высоких технологий, расширение образовательного и высокотехнологических рынков, обеспечит привлекательность города для молодых перспективных исследователей, развитие инфраструктурных связей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Файков Д.Ю., Байдаров Д.Ю. Влияние новой модели диверсификации атомной отрасли на развитие территорий присутствия (теоретические и практические аспекты). *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз.* 2021;14(3):135–149. http://dx.doi.org/10.15838/esc.2021.3.75.8

Faikov D.Yu., Baidarov D.Yu. The impact of the new model of nuclear industry diversification on the development of the territories of presence (theoretical and practical aspects). *Economic and social changes: facts, trends, forecast*. 2021;14(3):135–149. http://dx.doi.org/10.15838/esc.2021.3.75.8

2. Фомин М. Атомграды: каркас развития страны. *Новый атомный эксперт.* 2023;5. Режим доступа: https://atomicexpertnew.ru/nuclear_cities_the_framework_for_the_development_of_the_country (дата обращения: 11.08.2024).

3. Кожевников С.А., Ворошилов Н.В. Агломерационные процессы в регионах России: особенности и проблемы активизации позитивных эффектов. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз.* 2024;17(1):91–109. Режим доступа: http://esc.vscc.ac.ru/article/29895/full (дата обращения: 28.04.2024).

4. Меркурьев В.В., Жигалова И.А., Мягков Е.В. Сущность, содержание и теоретические подходы к развитию агломераций в России. *Управленческий учет.* 2022;2-3:632–640. Режим доступа: https://upravuchet.ru/index.php/journal/article/view/1734 (дата обращения: 15.05.2024).

5. Руденко В.А., Привалова Н.Ф., Томилин С.А., Попова Т.С. Роль стратегических инициатив вуза в сервисноинфраструктурной модели развития города присутствия госкорпорации «Росатом» на примере ВИТИ НИЯУ МИФИ. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;4(45):101–116. http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-10

Rudenko V.A., Privalova N.F., Tomilin S.A., Popova T.S. Role of VETI NRNU MEPhI strategic initiatives in service and infrastructure model to develop the city of state Corporation Rosatom presence. *Global nuclear safety*. 2022;4(45):101–116. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-10

6. Привалова Н.Ф., Руденко В.А., Бубликова И.А. Образовательные организации высшего образования как драйвер развития территорий расположения АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;12(3):86–98. http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-08

Privalova N.F., Rudenko V.A., Bublikova I.A. Educational institutions of higher education as development driver of Nuclear Power Plant areas. *Global nuclear safety*. 2022;12(3):86–98. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-03-08

7. Сарымова А.А., Гусева М.С. Оценка влияния агломерационных процессов на социально-экономическое развитие муниципальных образований региона. *Вестник Самарского государственного экономического университета.* 2022;5(211):28–38. http://dx.doi.org/10.46554/1993-0453-2022-5-211-28-38

Sarymova A.A., Guseva M.S. Assessment of the impact of agglomeration processes on the socio-economic development of municipalities in the region. 2022;5(211):28–38. (In Russ.). 2022;5(211):28–38. http://dx.doi.org/10.46554/1993-0453-2022-5-211-28-38

8. Пузанов А.С., Попов Р.А., Полиди Т.Д., Гершович А.Я. Городские агломерации в современной России: проблемы и перспективы развития. Монография. Москва: Фонд «Институт экономики города», 2023. 192 с. Режим доступа: https://www.urbaneconomics.ru/sites/default/files/gorodskie_aglomeracii.pdf (дата обращения: 15.05.2024).

9. Руденко В.А., Головко М.В., Агапова С.П., Рогачева Ж.С., Ткачев В.Г., Анцибор А.В., Сетраков А.Н. Соучастное проектирование в маркетинге территорий размещения АЭС как фактор обеспечения социально-

экономической безопасности. Глобальная ядерная безопасность. 2020;(2):109–118. https://doi.org/10.26583/gns-2020-02-09

Rudenko V.A., Golovko M.V., Agapova S.P., Rogacheva J.S., Tkachev V.G., Antsibor A.V., Setrakov A.N. Cooperative design in marketing of NPP location territories as a factor of social and economic security. *Global nuclear safety.* 2020;(2):109–118. (In Russ.). https://doi.org/10.26583/gns-2020-02-09

ВКЛАД АВТОРОВ:

Руденко В.А. – концептуализация статьи, предоставление материалов авторских исследований по изучаемой проблеме, анализ влияния агломерационных процессов на развитие территории присутствия предприятий ГК «Росатом»;

Ухалина И.А. – исследование механизма взаимодействия ГК «Росатом», региона и территории непосредственного присутствия предприятий корпорации, анализ проблем развития и ресурсных возможностей атомграда-Волгодонска;

Анцибор А.В. – обоснование необходимости корректировки финансово-инвестиционного механизма используемого при финансировании города Волгодонска;

Ефименко Н.А. – анализ аналитических обзоров специалистов в области развития территорий присутствия предприятий ГК «Росатом», анализ научной литературы по заявленной тематике;

Головко М.В. – анализ основных направлений стратегического развития атомграда, формулирование выводов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Rudenko V.A. – conceptualization of the article, provision of original research materials on the problem under study, analysis of the influence of agglomeration processes on the development of the territory of presence of Rosatom State Corporation enterprises;

Ukhalina I.A. – study of the mechanism of interaction between Rosatom State Corporation, the region and territory of direct presence of the corporation's enterprises, analysis of development problems and resource capabilities of the nuclear city-Volgodonsk;

Antsibor A.V. – justification of the need to adjust the financial and investment mechanism used in financing the city of Volgodonsk;

Efimenko N.A. – analysis of analytical reviews of specialists in the field of development of territories where Rosatom State Corporation enterprises operate, analysis of scientific literature on the stated topic;

Golovko M.V. – analysis of the main directions of strategic development of the nuclear city, formulation of conclusions.

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:

Валентина Анатольевна Руденко, д.с.н., заведующий кафедрой экономики и социально-гуманитарных дисциплин, руководитель, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
https://orcid.org/0000-0002-6698-5469
WoS Researcher ID: B-7730-2016
e-mail: VARudenko@mephi.ru

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.
http://orcid.org/0000-0002-1928-7510
e-mail: IAUkhalina@mephi.ru

Анна Васильевна Анцибор, к.э.н., доцент кафедры экономики и социально-гуманитарных дисциплин, заместитель руководителя, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Valentina A. Rudenko, Dr. Sci. (Soc.), Head of the Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.
https://orcid.org/0000-0002-6698-5469
WoS Researcher ID: B-7730-2016
e-mail: VARudenko@mephi.ru

Irina A. Ukhalina, 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.
http://orcid.org/0000-0002-1928-7510
e-mail: IAUkhalina@mephi.ru

Anna V. Antsibor Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Economics and Social and Humanitarian Disciplines, Deputy Head of Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk,

г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.
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.
https://orcid.org/0000-0001-8113-6759
e-mail: NAEfimenko@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.
http://orcid.org/0000-0002-4835-9800
e-mail: golovko178@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 11.11.2024
После доработки / Revised 02.12.2024
Принята к публикации / Accepted 05.12.2024

Rostov region, Russian Federation.
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.
https://orcid.org/0000-0001-8113-6759
e-mail: NAEfimenko@mephi.ru

Maria V. Golovko, Dr. Sci. (Econ.), Professor, Department of Institutional Economics and Investment Management, I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation.
http://orcid.org/0000-0002-4835-9800
e-mail: golovko178@mail.ru

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Анцибор А.В.	91
Аркадов Г.В.	55
Балябин А.И.	42
Герасимов С.И.	42
Головко М.В.	91
Гоок А.Э.	34
Гордеева Е.Л.	5
Губеладзе А.Р.	19
Губеладзе О.А.	19
Егорова В.П.	80
Елохин А.П.	27
Ефименко Н.А.	91
Жидков М.Е.	34
Иваний М.Б.	34
Кривин В.В.	71
Ладин Д.А.	42
Лапкис А.А.	80
Литовченко М.Н.	5
Маджидов А.И.	27
Маскайкин С.А.	42
Мельников Э.С.	5
Никифоров В.Н.	80
Павличенко А.В.	34
Поваров В.П.	5
Потапов М.А.	5
Росновский В.С.	5
Росновский С.В.	5
Руденко В.А.	91
Слепов М.Т.	55
Смирнов Д.Ю.	42
Сурин В.И.	34
Томилин С.А.	34
Улин С.Е.	27
Ухалина И.А.	91
Харин А.Н.	5
Цыхлер Л.В.	80
Шаброва Т.С.	42
Шихалиев Х.С.	5
Шпицер В.Я.	71
Шустов А.Е.	27
Щербаков А.А.	34
Щербань А.С.	34

AUTHOR INDEX

Antsibor A.V.	91
Arkadov G. V.	55
Balyabin A.I.	42
Efimenko N.A.	91
Egorova V.P.	80
Elokhin A.P.	27
Gerasimov S.I.	42
Gok A.E.	34
Golovko M.V.	91
Gordeeva E.L.	5
Gubeladze A.R.	19
Gubeladze O.A.	19
Ivanov M.B.	34
Kharin A.N.	5
Krivin V.V.	71
Ladin D.A.	42
Lapkis A.A.	80
Litovchenko M.N.	5
Majidov A.I.	27
Maskaikin S.A.	42
Melnikov E.S.	5
Nikiforov V.N.	80
Pavlichenko A.V.	34
Potapov M.A.	5
Povarov V.P.	5
Rosnovsky S.V.	5
Rosnovsky V.S.	5
Rudenko V.A.	91
Shabrova T.S.	42
Shcherbakov A.A.	34
Shcherban A.S.	34
Shikhaliev H.S.	5
Shpitser V.Ya.	71
Shustov A.E.	27
Slepov M. T.	55
Smirnov D.Y.	42
Surin V.I.	34
Tomilin S.A.	34
Tsykhler L.V.	80
Ukhalina I.A.	91
Ulin S.E.	27
Zhidkov M.E.,	34

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Полный текст статьи для опубликования должен быть оригинальным – не более 20% заимствований, сопровождаться экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, соответствовать приведенным ниже правилам оформления.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- индекс УДК;
- название на русском и английском языках;
- инициалы и фамилия авторов на русском и английском языках;
- аффилиация каждого автора на русском и английском языках;
- структурированная по IMRAD аннотация (200-270 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- текст статьи;
- объединенный Список литературы / References (см. пример оформления);
- сведения об авторах (для каждого автора – Фамилия Имя Отчество, место/а работы, должность/и, ученая степень, звание, электронный адрес, индекс ORCID (http://orcid.org), телефон контактного автора) на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована: введение (актуальность темы; обзор проблемы; цель работы); методология (теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов; описание материалов и методов анализа; статистическая обработка); результаты и их обсуждение; заключение (выводы). Цель и ключевые результаты работы должны быть понятно представлены в аннотации и тексте статьи, научная новизна работы обоснована во введении со ссылкой на источники, опубликованные в научных рецензируемых изданиях (в том числе зарубежных) последних нескольких лет. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы и полученные результаты.

Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и упоминаться в тексте статьи непосредственно перед самими формулами.

Включение таблиц в статью должно быть целесообразным, сопровождаться нумерацией, заголовками на русском и английском языках (10 пт) и ссылками в тексте непосредственно перед самими таблицами.

Рисунки должны быть четкими, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами.

Статья оформляется в Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 через 1 интервал, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, без знаков принудительного переноса и дополнительных пробелов. Поля со всех сторон – 2 см. Желательный объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (количество источников определяется автором исходя из поставленной научно-исследовательской цели). Если в тексте менее 2700 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=193511 с указанием выходных данных и режима доступа, по которым их можно найти в Интеренете. Доклады конференций могут быть включены в список литературы, если они доступны в Интернете, при этом указывается режим доступа и дата обращения.

Для соблюдения правил слепого рецензирования необходимо создать копию файла со статьей, удалить персональные данные, содержащиеся в тексте файла и его свойствах (в тексте статьи удалить имена авторов и наименования их мест работы, ссылки на работы авторов в списке литературы заменить на «Автор, год», информацию об авторах следует удалить из свойств документа), сохранить в формате pdf с названием «На рецензирование_Название/начало названия статьи…».

Для принятия статьи в номер журнала необходимо загрузить файл со статьей в формате Word на платформе elpub – https://glonucsec.elpub.ru/jour/index – и предоставить следующие материалы по электронной почте oniviti@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.

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Северцев Н.А., Юрков Н.К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2023. 568 с. Режим доступа: https://elib.pnzgu.ru/library/1699606807 (дата обращения: 30.01.2024).

Severtsev N.A., Yurkov N.K. Safety of dynamic systems at the stages of life cycle. Monograph. Penza: Publishing house of Penza State University, 2023. 568 p. (In Russ.) Available at: https://elib.pnzgu.ru/library/1699606807 (accessed: 30.01.2024).

2. Файков Д.Ю., Байдаров Д.Ю. Диверсификация в атомной отрасли: современное состояние, особенности, перспективы. *Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России.* 2021;2:41–48. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46289137 (дата обращения: 30.01.2024).

Faykov D.Yu., Baidarov D.Yu. Diversification in the nuclear industry: current state, features, prospects. *Scientific bulletin of the military-industrial complex of Russia.* 2021;2:41–48. (In Russ.) Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46289137 (accessed: 30.01.2024).

3. Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Мясников С.В., Петрунин Н.В., Терашкевич С.С. Эксплуатационный контроль состояния металла корпусов растворных реакторов в НИЦ «Курчатовский институт». *Вопросы материаловедения*. 2022;(4(112)):191–198. https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198

Boikova T.V., Kochnov Y.O., Myasnikov S.V., Petrunin N.V., Terashkevich S.S. Operational monitoring of the metal of solution pressure vessel reactors at NRC «Kurchatov institute». *Voprosy Materialovedeniya.* 2022;4(112):191–198. (In Russ.) https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-112-4-191-198

4. Антонов А.Ю., Васильева С.В., Рубцов В.С., Тутнов И.А., Шпара И.А. Метод схематизации дефектов в кольцевых сварных соединениях трубопроводов. *Наука и техника в газовой промышленности.* 2022;4:82–89. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_50001041_15889718.pdf (дата обращения: 30.01.2024).

Antonov A.Yu., Vasilieva S.V., Rubtsov V.S., Tutnov I.A., Shpara I.A. Method of schematization of defects in annular welded joints of pipelines. *Science and technology in the gas industry.* 2022;4:82–89. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_50001041_15889718.pdf (accessed: 30.01.2024).

5. Соболев А.В., Тутнов И.А., Царев В.С., Украинцев В.Ф. Метод интегральной оценки надежности оборудования и персонала энергоблока АЭС при длительном сроке эксплуатации. *Атомная энергия.* 2021;130(3):152–158. Режим доступа: https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4279/4857 (дата обращения: 30.01.2024).

Sobolev A.V., Tutnov I.A., Tsarev V.S., Ukraintsev V.F. Method of integral reliability assessment of equipment and personnel of long-operating NPP power unit. *Atomic Energy.* 2021;130(3):161–166. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=47521153 (accessed: 30.01.2024).

6. Камышев А.В., Данилов А.В., Пасманик Л.А. [и др.] Применение метода акустоупругости для определения остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях. *В мире неразрушающего контроля.* 2020;23(3):10–19. https://doi.org/10.12737/1609-3198-2020-10-19

Kamyshev A.V., Danilov A.V., Pasmanik L.A. [et. al.] Apply the Acoustoelastic Method to Determine Residual Stresses in Welded Joints. *NDT World.* 2020;23(3):10–19. https://doi.org/10.12737/1609-3198-2020-10-19

7. Камышев А.В., Пасманик Л.А., Ровинский В.Д., Гетман А.Ф., Губа С.В. Способ определения остаточных напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов (варианты). Патент RU 2711082 C1 Российская Федерация, МПК G01N 29/07 (2006.01). № 2019110165/28. Заявлен: 05.04.2019. Опубликован: 15.01.2020. 6 с. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115 (дата обращения 10.01.2024).

Kamyshev A.V. Pasmanik L.A., Rovinskij V.D., Getman A.F., Guba S.V. Method for determination of residual stresses in weld metal welded joints of pipelines (versions). Patent Russia RU 2711082 C1: 15.01.2020. (In Russ.) Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2711082C1_20200115 (accessed: 10.01.2024).

8. Гетман А.Ф. Теории и технологии обеспечения прочности технических объектов. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2019. 629 с. Режим доступа: https://search.rsl.ru/ru/record/01010147510 (дата обращения 10.01.2024).

Getman A.F. Theories and technologies for ensuring the strength of technical objects. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2019. 629. (In Russ.) Available at: https://search.rsl.ru/ru/record/01010147510 (accessed: 10.01.2024).

9. Appleton J.D., Kendall G.M. Gamma-radiation levels outdoors in Great Britain based on K, Th and U geochemical data. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2022;271-272:106948. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106948

10. Folly C.L., Konstantinoudis G., Mazzei-Abba A., Kreis C., Bucher B., Furrer R., Spycher B.D. Bayesian spatial modelling of terrestrial radiation in Switzerland. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;233:106571 https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106571

Адрес редакции журнала:
347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», oni-viti@mephi.ru
Выпускающий редактор: Лобковская Надежда Ивановна, +79281883628, NILobkovskaya@mephi.ru

NOTES FOR AUTHORS

(!) Please, pay attention: the article formatting requirements have been updated in order to expand the international readership of the journal since

The full text of the article to be published must be original – no more than 20% borrowings, it must be accompanied by an expert resolution on publication possibility in the open press, and it must comply with the following rules.

One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title in Russian and English;
- authors' initials and surnames in Russian and English;
- an affiliation in Russian and English for each author;
- the structured abstract (200-270 words) in Russian and English according to IMRAD;
- keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- article text;
- Combined List of References / References (see example design);
- information about the authors in Russian and English (each author should provide a full name, a place of work, position/s, an academic degree, a rank, e-mail address, ORCID index (http://orcid.org), contact phone number).

The article should be structured: introduction (relevance of the topic; review of the problem; purpose of the work); methodology (issue theory; detailed description of experiment methodology; description of materials and methods of analysis; statistical processing); results and their discussion; conclusions. The objective and key results of the work should be clearly presented in the abstract and the text of the article, the scientific novelty of the work is justified in the introduction with reference to the sources published in scientific peer-reviewed publications (including foreign ones) in the last few years. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The Equation 3.0 editor is recommended when writing formulas. All formulas are aligned to the center of the page, numbered in parentheses on the right and referred to in the text of the article just ahead of the formulas.

Inclusion of tables in the article should be appropriate, they should be numbered and have headings in Russian and English (10 pf) and links in the text just ahead of the tables.

Figures should be clear, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions.

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Without any signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article is no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (the number of sources is determined by the author on the basis of the research objective). If the text of the article is less than 2700 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=193511 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*. 2019;2(1):47–51. https://doi.org/10.24069/2742-0267-2019-1-1-12

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/10.1197/0739456X19827083

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):199–189. 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 nondestructive testing data. *Journal of Physics: Conference Series. Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding*. 2021;(2131):052061 (In Russ.) https://doi.org/10.1088/1942-6596/2131/5/052061

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. 2019:96–98. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1836web.pdf (accessed: 10.05.2023).

10. Golyandina N., Zhigljavsky A. Singular spectrum analysis for time series. SpringerBriefs in Statistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin. Heidelberg, 2020. ISBN 978-3-662-62435-7. Available at: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62436-4 (accessed: 19.05.2023).

Editorial office address (for sending printed correspondence):
347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94
Editorial office of «Global Nuclear Safety» journal, oni-viti@mephi.ru
Executive Editor: Nadezhda I. Lobkovskaya, +79281883628, NILobkovskaya@mephi.ru