



ИРМ  
РОСАТОМ

---

Адрес: а/я 29, г. Заречный, Свердловская обл., 624250  
Тел.: +7 (34377) 3 50 01  
Факс: +7 (34377) 7 33 46  
E-mail: [irm@irmatom.ru](mailto:irm@irmatom.ru)  
[www.irm-atom.ru](http://www.irm-atom.ru)

---

# НАУЧНЫЙ ГОДОВОЙ ОТЧЕТ

## Об основных исследовательских работах, выполненных в 2022 году

г. Заречный, 2023

НАУЧНЫЙ  
ГОДОВОЙ  
ОТЧЕТ  
АО «ИРМ»

2022

РЕЗУЛЬТАТЫ  
ДОСТИЖЕНИЯ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК: 620.18

ГРНТИ: 58.33.09

Научный годовой отчет АО «Институт реакторных материалов» (отчет об основных научно-исследовательских работах, выполненных обществом в 2022г.) — Заречный, АО «ИРМ», 2023. — 88 с

Отчет содержит информацию о выполненных в 2022 году исследованиях и результатах работы по основным направлениям научно-технической деятельности АО «ИРМ», включая:

- результаты реакторных испытаний топливных и конструкционных материалов;
- результаты материаловедческих исследований топливных, конструкционных и функциональных материалов, используемых в активных зонах реакторов на быстрых и тепловых нейтронах;
- результаты исследований элементов конструкций реакторных установок после длительной эксплуатации в действующих энергетических реакторах, а также опытных образцов конструкций активных зон инновационных реакторных установок после эксплуатации в условиях испытательных стендов ИР ИВВ-2М в условиях, моделирующих реальные режимы эксплуатации.

В отчете также представлены итоги издательской деятельности, участия научных сотрудников в работе семинаров, конференциях, выставках, отражено взаимодействие с партнерами научных учреждений УрО РАН ВУЗов.

Отчет предназначен для сотрудников научно-исследовательских организаций, конструкторских бюро, предприятий атомной промышленности и студентов соответствующих специальностей.

© Акционерное общество  
«Институт реакторных материалов»  
(АО «ИРМ»), 2023

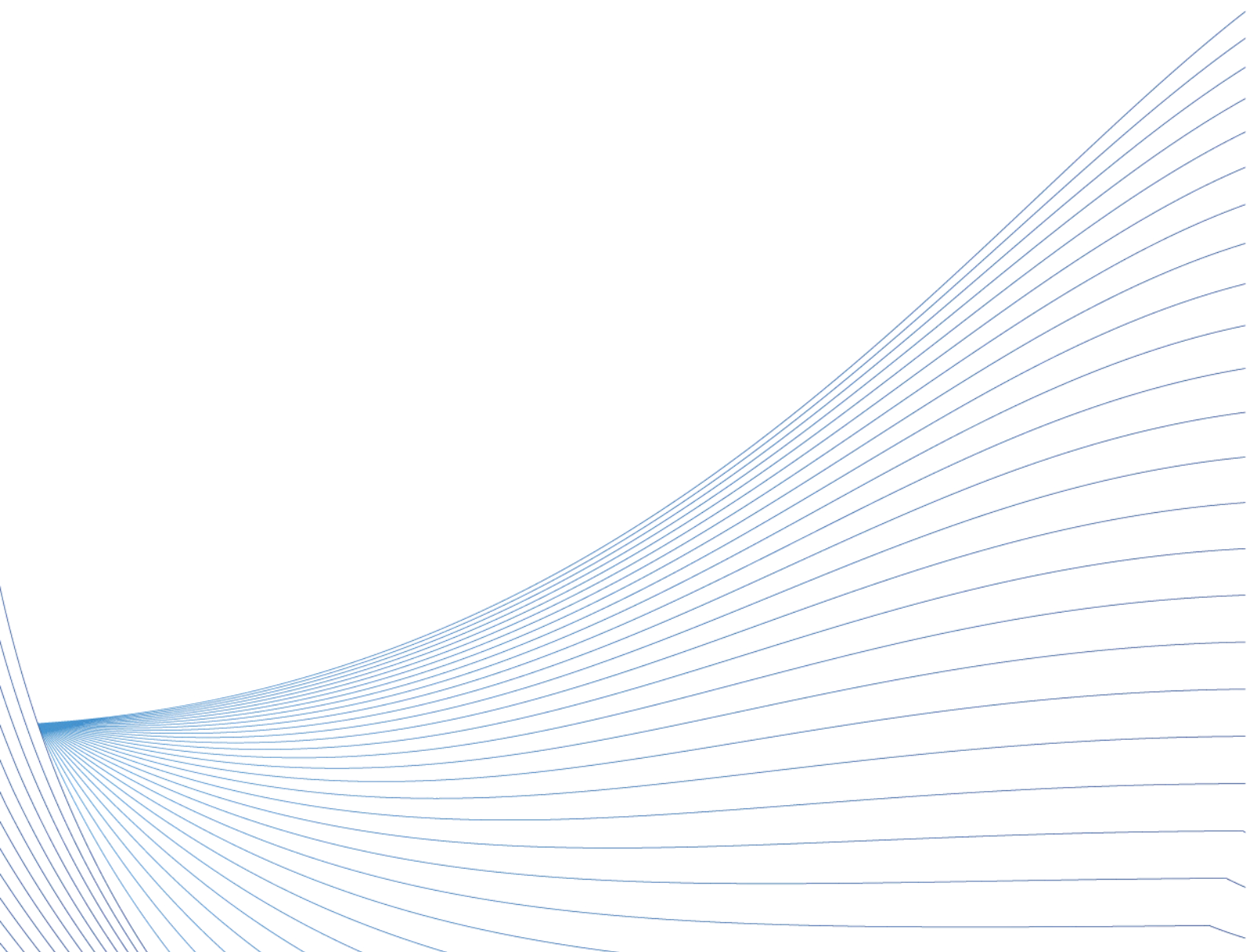
## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>ОБ ИНСТИТУТЕ</b> .....	<b>7</b>
КРАТКАЯ ИСТОРИЯ АО «ИРМ» .....	8
ШАРЫГИН ЛЕОНИД МИХАЙЛОВИЧ – СОЗДАТЕЛЬ И РУКОВОДИТЕЛЬ ЛАБОРАТОРИИ СОРБЕНТОВ ПРЕДПРИЯТИЯ .....	10
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	13
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	13
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТЕНДОВАЯ БАЗА И УНИКАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ УСТАНОВКИ... 14	
<i>Экспериментальные стенды Исследовательской ядерной установки ИВВ-2М</i> .....	14
<i>Стенд «ПУРС»</i> .....	14
<i>Стенд «РИСК»</i> .....	14
<i>Стенд «УРАЛ»</i> .....	14
<i>Экспериментальная база корпуса защитных камер для проведения материаловедческих исследований</i> .....	15
<i>Проведение первичных (неразрушающих) исследований</i> .....	15
<i>Пробоподготовка для материаловедческих исследований</i> .....	15
<i>Проведение механических испытаний</i> .....	16
<i>Определение физических и физико-механических характеристик материалов</i> .....	17
<i>Проведение структурных исследований</i> .....	17
<i>Проведение коррозионных испытаний и последующих коррозионных исследований</i> .....	19
<i>Проведение электрохимических исследований</i> .....	19
<i>Элементный анализ твердых и жидких проб</i> .....	19
СТРУКТУРА НАУЧНОГО БЛОКА.....	20
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ</b> .....	<b>21</b>
РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ .....	22
<i>Свинцовая петлевая установка АО «ИРМ»</i> .....	22
МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	24

<i>Методические аспекты способов, используемых в АО «ИРМ», для определения показателей коррозии сталей в свинце, содержащем кислород</i> .....	24
<i>Неразрушающий способ определения показателей коррозии сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях</i> .....	29
<i>Работы в обоснование увеличения ресурса КС СУЗ БН-600 до 800 эфф. суток</i> .....	32
<i>Исследование стали ЭП450, облученной в реакторе БН-600 в составе материаловедческой сборки МС-2.</i> .....	33
<i>Эмпирическая модель целевой коррозии стали 316L в условиях хранения вторичных отходов ЖРО АЭС «Фукусима» Дайичи</i> .....	34
<i>Экспериментальные исследования целевой коррозии стали AISI 316L в водных растворах, содержащих хлор-ионы</i> .....	37
<i>Структурно-текстурная наследственность в сплаве Zr-2,5% Nb</i> .....	41
<i>Результаты исследования кристаллографических особенностей сдвигового <math>\gamma</math>-<math>\alpha</math>-превращения в метастабильных сталях аустенитного класса после облучения</i> .....	42
<b>РАЗРАБОТКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ</b> .....	44
<i>Разработка автономных источников питания и накопителей энергии на основе радиоизотопов с бета-распадом нового поколения с повышенными вольт-амперными характеристиками</i> .....	44
<i>Проведение механических испытаний конструкции автономного радиоизотопного источника питания</i> .....	45
<i>Проведение ускоренных радиационных испытаний экспериментальных образцов автономных источников питания с жидким электролитом</i> .....	47
<i>Разработка углеродных матриц на основе резорцино-формальдегидной смолы, допированной изотопом <math>^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}</math>, для использования в качестве электродов радиоизотопных источников питания</i> .....	50
<i>Проведение энергетических испытаний экспериментальных образцов автономных источников питания с жидким электролитом</i> .....	51
<b>ДОСТИЖЕНИЯ</b> .....	55
<b>СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПО НАУКЕ</b> .....	56
<i>Наукометрические показатели за 2022 год</i> .....	56
<i>Внедрение вновь созданных результатов научно-технической деятельности (РНТД)</i> 56	
<b>ПРЕМИИ И НАГРАДЫ</b> .....	70
<b>ИТОГИ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ</b> .....	72
<b>ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ</b> .....	73
<b>ВЫСТАВКИ СЕМИНАРЫ КОНФЕРЕНЦИИ</b> .....	74

<i>Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов состоялась 12-16 сентября 2022 года в г. Екатеринбурге, организатор АО «ИРМ».</i>	74
<i>Выездная сессия Научного Совета РАН «Радиационная физика твердого тела», 21-23 ноября 2022, Заречный</i>	74
<i>Семинар-совещание</i>	74
<i>Международная выставка «Технопром - 2022»</i>	74
<i>Международная военно-техническая выставка «Армия – 2022»</i>	75
<i>Выставка «Иннопром – 2022»</i>	75
<b>ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПАРТНЕРАМИ.</b>	75
<i>Взаимодействие с ФГБУН ИЭФ УрО РАН</i>	75
<i>Взаимодействие с УрФУ</i>	75
<b>РАБОТА НТС ПО РАССМОТРЕНИЮ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b>	76
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	78
<i>Список сокращений и аббревиатур</i>	80

# ПРЕДИСЛОВИЕ





2022 год, указом Президента РФ, ознаменован началом десятилетия науки и технологий. Этот шаг позволит усилить роль науки в решении важнейших задач развития общества страны. И наш институт, как и ранее, продолжает работать в материаловедческом направлении и решать глобальные задачи Госкорпорации «Росатом».

В 2022 году АО «ИРМ» в рамках НИОКР, с использованием реакторно-стендовой базы, осуществлял работы по обоснованию проектных решений реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем РУ БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200. С использованием петлевой установки продолжают эксперименты по исследованию влияния реакторного облучения на коррозионное поведение конструкционных сталей в

динамических условиях в свинце, содержащем кислород.

При создании новой технологической базы крупномасштабной атомной энергетики предусматривается широкое внедрение высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР). Одним из основных этапов создания реакторов такого типа является исследование кинетики выхода основных газообразных продуктов деления из образцов микротвэлов, основной экспериментальной базой для которых служит стенд, созданный на реакторе ИВВ-2М, а также наработанные компетенции ученых и инженеров в данной области. Исследования данных характеристик имеют важное значение для обоснования безопасности разрабатываемых реакторных установок ВТГР и призвано обеспечить их последующую долгую и безаварийную эксплуатацию.

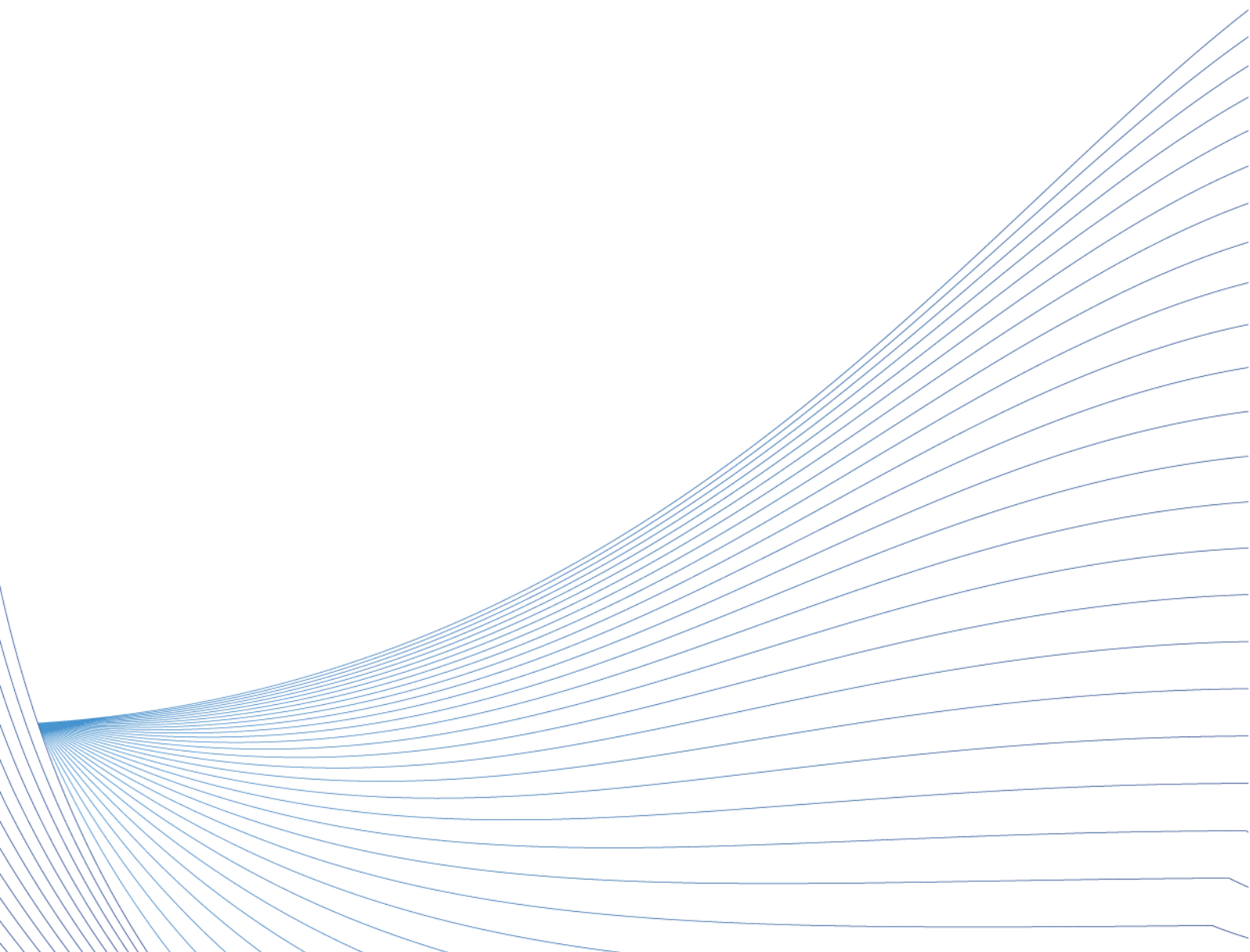
Результаты послереакторных исследований каналов СУЗ входят составной частью в обоснование безопасной эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК-1000 в концепции «45+». Продление срока эксплуатации энергоблоков на 5 лет позволит выработать более 245 млрд. кВт/ч. На основании полученных результатов исследований АО «НИКИЭТ» совместно с АО «ИРМ» разработали методику оценки ресурса каналов СУЗ по критерию водородного охрупчивания. Впервые разработаны методики исследования свойств стеклоподобных композиций в условиях защитных камер опытных ядерных ОВАО ФГУП «ПО «Маяк».

В рамках Единого Отраслевого Тематического плана Госкорпорации «Росатом», выполнены работы по проекту «Разработка автономных источников питания и накопителей энергии на основе радиоизотопов с бета-распадом нового поколения с повышенными вольт-амперными характеристиками». Проект направлен на создание атомных батарей нового типа, в которых используется бета-излучающий нуклид с высокой энергией излучения. Проведённые энергетические испытания свидетельствуют, что разработанная технология изготовления АИП позволяет преобразовывать энергию радиационного распада в электрическую с высокой эффективностью и с энергетическими характеристиками, превышающими мировые аналоги.

*Е.Н. Селезнев*



# ОБ ИНСТИТУТЕ



## КРАТКАЯ ИСТОРИЯ АО «ИРМ»

Акционерное общество «Институт реакторных материалов» (далее – АО «ИРМ», институт, предприятие) – атомный центр Урала материаловедческого профиля, основано в 1966 году, входит в научный дивизион Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».



Миссия АО «ИРМ» - развитие инновационной атомной энергетики, ядерных и радиационных технологий во имя национальной безопасности и здоровья человека. Институт проводит реакторные испытания и послереакторные исследования для атомной промышленности в соответствии с самыми современными мировыми требованиями. Обладает мощной производственной базой: исследовательский реактор ИВВ-2М для наработки

изотопного сырья и исследовательских работ, горячие камеры, радиохимическое оборудование, участок по изготовлению облучательных устройств.

– 1962 год - Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР издан приказ о строительстве реактора ИВВ-2. Реактор должен использоваться для выполнения научно-исследовательских работ и подготовки специалистов.

– 1965 год - принят в эксплуатацию пусковой комплекс реактора ИВВ-2. Директором назначается Борисов Михаил Алексеевич.

– 1966 г. - филиалу предприятия было присвоено открытое наименование СФТИ - Свердловский физико-технический институт. Эксплуатационным персоналом исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М совместно с пусковой бригадой СФТИ был успешно проведён физический пуск реактора ИВВ-2М, в связи с чем началом деятельности СФТИ (в настоящее время - АО «ИРМ») принято считать дату физического пуска - 23 апреля 1966 г.

– 1969 год - Приказом Министерства среднего машиностроения от 12 мая 1969 г. на базе комплекса зданий реактора ИВВ-2М был образован Свердловский филиал Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники (СФ НИКИЭТ). Директор – Зеленов Виктор Иванович.

– Основными научно-техническими задачами предприятия были определены исследования радиационно-коррозионной стойкости реакторных материалов и элементов конструкции реактора; исследования способов ядерного перегрева применительно к перспективным проработкам ядерных реакторов для АЭС; исследования свойств неорганических сорбентов; разработка оптимальных режимов и схем очистки вод; исследования методик промышленного активационного анализа; исследования характеристик активных зон исследовательских и материаловедческих реакторов; исследования по физике твёрдого тела.

– 1973 год - Введен в эксплуатацию корпус с комплексом защитных камер и боксов (далее - КЗК), оснащенных, на тот период времени, современным материаловедческим оборудованием с дистанционным управлением, обеспечивающим

безопасное проведение работ с радиоактивными материалами. С этого времени предприятие сформировалось как специализированный материаловедческий центр для проведения научно-исследовательских работ в интересах ускоренного развития атомной энергетики.

– 1974-1976 год -, проведена реконструкция реактора ИВВ-2, мощность которого была увеличена с 2 до 10 МВт, и реакторный комплекс получил аббревиатуру ИВВ-2М. Также проведена модернизация экспериментальных стендов и устройств для исследования материалов при облучении в реакторе. Решение задачи перевода бассейновых реакторов на принципиально новую разновидность топливной композиции для ТВС на металлокерамической основе позволило в 1980-е гг. перейти на 15 МВт.

– 1991 год - директором назначен Перехожев Виктор Иванович.

– 1994 – создано подразделение радиационных технологий для производства радиоизотопной продукции.

– 1997 год - Предприятие получило статус Государственного унитарного дочернего предприятия – ГУДП «СФ НИКИЭТ», являющегося правопреемником СФ НИКИЭТ.

– 2003 год - Приказом Министерства Российской Федерации по атомной энергии от 08 августа 2003 г. № 348 дочернее предприятие было реорганизовано и выделено от ФГУП «НИКИЭТ» в качестве самостоятельного предприятия - ФГУП «Институт реакторных материалов» (ФГУП «ИРМ»), являвшегося правопреемником ГУДП «СФ НИКИЭТ».

– 2009 год - В соответствии с Указом Президента от 27.04.2007 года № 556 и распоряжением Федерального агентства по управлению государственным имуществом от 30 июня 2009 № 1131-р ФГУП «ИРМ» было преобразовано в ОАО «ИРМ», которое согласно решению ГК-038 от 10.02.2010 года является эксплуатирующей организацией исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М.

– 2010 год - директором назначен Дьяков Александр Андреевич.

– 2013 год - директором назначен Марков Дмитрий Владимирович.

– 2014 год - В связи с вступлением в силу положений Федерального закона от 05.05.2014 №99-ФЗ «О внесении изменений в главу 4 части первой Гражданского кодекса Российской Федерации и о признании утратившими силу отдельных положений законодательных актов Российской Федерации» ОАО «ИРМ» сменило фирменное наименование на Акционерное общество «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ»).

– 2018 год – директором АО «ИРМ» назначен Ильин Кирилл Игоревич.

– 2019 год – октябрь 2020 г. – временно исполняет обязанности директора АО «ИРМ» Селезнев Евгений Николаевич.

– 2020 год - Селезнев Евгений Николаевич назначен директором АО «ИРМ».

– 2020 год – запущен в эксплуатацию участок по изготовлению и испытанию экспериментальных автономных радиоизотопных источников питания

– В настоящее время проводится модернизация комплекса с исследовательским ядерным реактором ИВВ-2М в соответствии с планом мероприятий по реконструкции и модернизации систем и оборудования. Модернизация позволит продлить срок эксплуатации реактора до 2040 года.

## ШАРЫГИН ЛЕОНИД МИХАЙЛОВИЧ – СОЗДАТЕЛЬ И РУКОВОДИТЕЛЬ ЛАБОРАТОРИИ СОРБЕНТОВ ПРЕДПРИЯТИЯ



Шарыгин Леонид Михайлович (1941-2016) – доктор технических наук (1983), профессор, лауреат Государственной премии СССР (1988), Заслуженный изобретатель РФ (2002), автор более 300 научных публикаций и трех монографий; автор более 100 изобретений в области создания сорбционных материалов для очистки технологических вод атомных установок, создано опытное производство сорбентов марки Термоксид. Первый директор ПНФ «ТЕРМОКСИД».

Шарыгин Л.М. в 1959 году, после окончания средней школы, поступил на физико-технический факультет Уральского политехнического института (УПИ), зачислен в группу студентов кафедры радиохимии по проблемам очистки водных сред от радиоактивных загрязнений. Уже в студенческие годы

Шарыгин Л.М. кафедрой радиохимии был привлечен к научно-исследовательским работам по государственным программам развития новых технологий под руководством талантливых преподавателей: М.В. Смирнова, В.В. Пушкарева. В 1964 году, до окончания УПИ, получил первое авторское свидетельство. Поступив в аспирантуру в 1964 году, увлекся исследованиями адсорбционных процессов и физико-химической механикой дисперсных систем, используя высокий научный потенциал кафедры. Самостоятельно изучил публикации ведущих ученых в этой области, которые определили его научные взгляды. В 1969 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Экспериментальные и теоретические исследования влияния замораживания на свойства гидрогелей».

После защиты диссертации, в 1969 году принят на работу руководителем лаборатории сорбентов и водоподготовки реактора ИВВ-М (СФ НИКИЭТ), г. Заречный, Свердловской области.

В связи с интенсивной разработкой атомных энергетических установок нового поколения, ведущие научные руководители страны – академики М.В. Келдыш, Н.А. Доллежал, Б.Н. Ласкорин, А.П. Александров, Г.Н. Флеров, поставили перед научными центрами страны стратегические задачи по развитию атомной энергетики. Одной из таких задач являлась разработка термостойких неорганических сорбентов для очистки водного теплоносителя АЭУ нового поколения от продуктов коррозии и радионуклидов, к решению которой, в 1969 году, была привлечена лаборатория сорбентов СФ НИКИЭТ под руководством к.х.н. Л.М. Шарыгина. Для решения актуальных проблем Леонид Михайлович привлек выпускников физико-технического факультета УПИ, между которыми был распределен план поиска устойчивых оксидных модификаций в условиях работы реактора.

Ученые СФ НИКИЭТ, под руководством Шарыгина Л.М. к 80-му году разработали технологию производства термостойких сорбентов: ГДТ, ГДТ-М, ГДО-М. Через процесс модифицирования были созданы метастабильные сорбенты, обладающие большей удельной поверхностью.

Базовый синтез получения сорбентов класса оксигидроксидов и композитов на их основе был защищен многочисленными патентами и представляет мировой уровень технологии производства новых материалов. Подтверждением этому являются авторские свидетельства СССР, полученные учеными СФ НИКИЭТ.

Параллельно с разработками и исследованиями проводилась испытания сорбентов в реальных условиях эксплуатации. Проведены длительные испытания термостойких сорбентов марок ГДТ, ГДТ-М, ГДО-М для очистки водного теплоносителя первого контура Белоярской АЭС от продуктов коррозии и радионуклидов. Выполнены испытания сорбента ГДТ-М на Ленинградской АЭС. По результатам этих работ сорбент ГДТ-М рекомендован для очистки горячих потоков теплоносителя атомных станций типа РБМК и атомных станций теплоснабжения (АСТ).

Результаты успешных испытаний позволили в 1976 году провести модернизацию системы очистки теплоносителя исследовательского реактора ИВВ-2М (СФ НИКИЭТ) с применением неорганических сорбентов ГДТ. Сорбент ГДТ нашел применение в системах очистки водного теплоносителя на всех исследовательских реакторах бассейнового типа в городах Томск, Киев, Минск. Ресурс работы сорбента на реакторе ИВВ-2М составил около 30 лет.

С участием Л.М. Шарыгина в 1984 году была осуществлена загрузка сорбентов ГДТ и Т-23 в систему очистки водного теплоносителя атомного реактора ледокола «Ленин».

Высоким научным достижением лаборатории в 80-е годы явилась разработка уникальной «золь-гель» технологии получения гранулированных неорганических сорбентов на основе гидратированных оксидов титана, циркония и олова, которая была выбрана основным направлением деятельности лаборатории сорбентов СФ НИКИЭТ. С использованием «золь-гель» технологии был синтезирован сорбент Термоксид-3А с повышенной селективностью к радионуклидам цезия, что позволило использовать этот ионообменник в промышленном масштабе в 2000 году для очистки воды бассейнов выдержки отработавшего топлива I и II энергоблоков Белоярской АЭС.

Сорбент «Термоксид-5» (оксид титана) создан по заказу ГЕОХИ для разработки технологии извлечения урана из морской воды.

Сорбент «Термоксид-58» (диоксид титана) создан в 1989 году для участия СССР в испытаниях систем очистки парогазовых выбросов из-под контаймента реактора от аэрозолей и радионуклидов йода при тяжелой аварии в рамках международной программы АСЕ. Результаты этих испытаний признаны успешными.

Торговая марка «Термоксид» присвоена сорбентам, разработанных учеными СФ НИКИЭТ под руководством профессора Л.М. Шарыгина, и зарегистрирована в патентном ведомстве страны ВНИИГПЭ в 1981 году. Эти сорбенты обладают термической, химической и радиационной стойкостью в агрессивных средах.

Сорбенты марок «Термоксид» прошли успешные испытания за рубежом, по результатам участия в международных испытаниях запатентованы технологии получения сорбентов на основе оксидов титана, олова и циркония за рубежом, патент США № 5190907 (1989).

На основе комплекса научных разработок и создания новых технологий производства термостойких сорбентов в 1983 году Леонид Михайлович защищает докторскую диссертацию. В 1988 году он удостоен ученого звания профессора и в этом же году Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР работам по созданию новых сорбентов была присуждена ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПРЕМИЯ СССР и ему был вручен диплом Лауреата Государственной премии СССР.

Шарыгин Л.М. являлся авторитетным специалистом в научном мире, в 2005 году избирается в состав ученого совета физико-технического факультета УрФУ. Занимался подготовкой научных и инженерных кадров: под его руководством защищены 10 кандидатских и две докторских диссертации в области создания новых сорбционных технологий и материалов.

После Чернобыльской аварии для обеспечения атомной энергетики и других отраслей новыми сорбционными материалами Приказом Министерства РФ по АЭ в 1994 году была организована ЗАО Производственно-научная фирма (ПНФ) «Термоксид», директором которой назначается профессор Л.М. Шарыгин.

Результатом деятельности Л.М. Шарыгина в период с 1994 по 2016гг. являются разработанные новые технологии, новые материалы и установки, организовано промышленное производство неорганических сорбентов марки «Термоксид», защищенные патентами и авторскими свидетельствами.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы АО «ИРМ» были направлены на обеспечение создания, безопасной эксплуатации и снятия с эксплуатации энергетических реакторов атомных электростанций, перспективных реакторных установок для ядерной энергетики и космических исследований с использованием уникальных объектов экспериментальной базы для проведения дореакторных, реакторных и послереакторных исследований в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии» (РТТН), Единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом», проекта «Прорыв», Стратегии развития двухкомпонентной атомной энергетики до 2050 года и других исследовательских программ.

Прикладные исследования и экспериментальные разработки были посвящены созданию и внедрению новых технологий, материалов, а также существенному улучшению характеристик уже созданных и внедренных объектов атомной энергии, включая элементы активных зон реакторов БН (твэлов отработавших ТВС реакторов БН с различными видами топлива и конструкционных материалов оболочек, поглощающих элементов рабочих органов СУЗ), материалов бланкетов термоядерных реакторов ITER и DEMO, топлива реакторов ВТГР в виде микротвэлов и топливных компактов и другие.

Отдельными направлениями научных исследований являются управление сроком службы конструкций, материалов активных зон ядерных энергетических реакторов, исследования по продлению службы ядерно-энергетических установок.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведение реакторных экспериментов и материаловедческих исследований по обоснованию применения перспективных материалов и поиски путей повышения ресурса эксплуатации топливных, конструкционных и функциональных материалов реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим натриевым и свинцовым теплоносителем.

Испытания образцов перспективных топливных композиций, макетов твэлов, топливных компактов и шаровых твэлов реакторов различного назначения с проведением уникальных реакторных экспериментов с моделированием реальных условий их эксплуатации по температуре и составу среды с постоянным мониторингом параметров работы испытательных стендов.

Разработка, изготовление и испытания автономных источников питания (АИП) с использованием радиоизотопов с альфа- и бета- излучением высоких удельных энергий для создания электрических батарей с повышенными вольт-амперными характеристиками.

Разработка технологических процессов обращения с радиоактивными отходами, обоснование безопасного обращения и хранения, в том числе обоснование стойкости материалов технологического оборудования.

С учетом текущих требований рынка переход на производство источников ионизирующих излучений медицинского и производственного назначения с созданием новых изотопов и соединений/ Реализация проектов, направленных на создание новой и модернизацию существующей реакторной и материаловедческой экспериментальной и производственной базы, на разработку новых методов исследований и испытаний топлива, материалов и элементов конструкций инновационных реакторных установок, обеспечивающих лидирующие позиции Госкорпорации «Росатом» в области атомной энергетики и производства радиоизотопов различного назначения.

Исследования коррозионного поведения топлива и конструкционных материалов различного назначения в условиях, моделирующих теплоносители и режимы

эксплуатации действующих и инновационных реакторных установок, а также режимы работы установок, используемых при отработке технологий обращения с ЖРО и ТРО в рамках выполнения работ по проектам отечественных и зарубежных заказчиков.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТЕНДОВАЯ БАЗА И УНИКАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ УСТАНОВКИ

### **Экспериментальные стенды Исследовательской ядерной установки ИВВ-2М**

Институт реакторных материалов обладает уникальной стендовой базой, которая позволяет проводить испытания различного типа на исследовательской ядерной установке ИВВ-2М, позволяющая приблизить экспериментальные условия к эксплуатационным.

#### **Стенд «ПУРС»**

Стенд «ПУРС» предназначен для термовакуумной подготовки, обеспечения и регистрации параметров ресурсных реакторных испытаний и проведения диагностических исследований термоэмиссионных электрогенерирующих каналов (ЭГК) ЯЭУ в составе петлевых каналов. Технологическая и измерительная системы стенда позволяют:

- обеспечивать контролируемую подачу/откачку технологических газов в/из полостей петлевого канала с целью регулирования температуры объектов испытаний и удаления газообразных продуктов деления) (ГПД).
- достигать и поддерживать температуру в объектах испытаний до 1800 °С;
- регистрировать параметры испытаний и архивировать их с периодичностью 1 раз в секунду;
- измерять удельную активность ГПД, откачиваемых из рабочей полости капсулы, в реальном режиме времени с помощью гамма-спектрометра Canberra на основе ОЧГ;
- нагрузочно-диагностическое устройство позволяет поддерживать электрические параметры объектов исследований в широком диапазоне мощности.

#### **Стенд «РИСК»**

Стенд «РИСК» предназначен для обеспечения реакторных испытаний твэлов, макетов твэлов и топливных композиций ЯЭУ различного назначения в инертной газовой среде (гелий, неон, гелий-неоновая смесь).

Технологическая и измерительная система стенда позволяет:

- обеспечивать контролируемую подачу гелия или неона (избыточным давлением до 1,5 бар) в рабочую и технологическую полости 8-ми капсул;
- производить периодическое продувание гелием или неоном (расходом газа от 1 до 10 см<sup>3</sup>/с) рабочей или технологической полостей капсул поочередно (для регулирования температуры объектов испытания посредством замены газов в полостях, для отбора проб газовой среды из полостей для последующего определения активности ГПД);
- измерять активность проб ГПД (в режиме «online» либо с использованием пробоотборных емкостей) с помощью гамма-спектрометра Canberra на основе ОЧГ;
- поддерживать и регистрировать температуры до 1800 °С объектов испытаний;
- архивировать параметры с периодичностью 1 раз в секунду.

#### **Стенд «УРАЛ»**

Стенд «УРАЛ» предназначен для проведения облучения конструкционных материалов и элементов изделий; проведения внутриреакторных механических



испытаний; проведения коррозионных испытаний в различных средах; исследования выхода радионуклидов из тяжелого жидкометаллического теплоносителя.

Данный стенд позволяет выполнить:

- облучение образцов в среде инертных газов и в вакууме при температурах 60-1600°C;
- коррозионные испытания в жидких и газовых средах при температурах 30-1000°C;
- механические испытания образцов конструкционных материалов при изменении нагрузки на образец от 0 до 2000 Н, а также изменений линейных размеров образца от 0 до 10 мм.

Технологические системы стенда обеспечивают:

- подачу и вакуумную регулировку газовой среды (азот, гелий, неон и их смеси) в газовых полостях облучательных устройств;
- принудительную и естественную циркуляцию жидкометаллического теплоносителя в реакторном и внереакторном циркуляционных контурах, а также рабочие параметры, близкие к эксплуатационным параметрам объектов исследования.

### ***Экспериментальная база корпуса защитных камер для проведения материаловедческих исследований***

В КЗК размещено 14 защитных камер (ЗК), образующих две цепочки, и четыре тяжелых защитных бокса. Кроме того, в корпусе имеются помещения, оборудованные для выполнения работ с изготовленными в ЗК образцами малой и средней активности. В них установлены установки, дублирующие оборудование, расположенное в ЗК и дополнительное исследовательское оборудование для проведения комплексных материаловедческих исследований конструкционных материалов после облучения.

С целью обеспечения достоверности измерительной информации, получаемой в процессе материаловедческих исследований, успешно проведена комплексная оценка состояния измерений. По результатам прохождения контрольных мероприятий получено свидетельство о состоянии измерений в лаборатории № 1-8.16/28-2022, подтверждающее соответствие выполняемых измерений предъявляемым к ним требованиям метрологических правил и норм.

### ***Проведение первичных (неразрушающих) исследований***

В защитных камерах АО «ИРМ» проводятся неразрушающие исследования изделий после облучения в ядерных энергетических установках:

- фотографирование и видеозапись внешнего вида изделий;
- измерение геометрических характеристик;
- двухкоординатное гамма - сканирование по длине твэлов,
- определение активности топлива и конструкционных материалов;
- гамма-сканирование микротвэлов ВТГР;
- дефектоскопический контроль оболочек твэлов, который осуществляется методом электропотенциального сканирования.

### ***Пробоподготовка для материаловедческих исследований***

Полный комплекс материаловедческих исследований реализуется благодаря соответствующей подготовке образцов. Облученные изделия проходят различные этапы пробоподготовки в соответствии с требованиями методик исследований для получения качественных результатов. Для резки изделий используется фрезерно-абразивный станок с дистанционным управлением. Конструкция станка и используемые датчики перемещения позволяют проводить точную разделку изделий на участки и вырезку из них образцов различной конфигурации согласно схемам разделки. Дополнительно имеется

комплекс малых станков для специальной вырезки и обработки образцов после крупной резки.

Имеющаяся экспериментальная база позволяет подготавливать образцы для проведения испытаний на измерение остаточного комплекса механических свойств изделий. Размер и геометрия образцов обеспечиваются наличием дополнительных приспособлений, позволяющих, в частности, наносить острый надрез заданной формы. Изготовление образцов небольших размеров, из заранее приготовленных заготовок – кольцевых, трубчатых, в виде пластин – выполняется на малогабаритном станке с использованием тонких алмазных дисков. Крепление различных образцов при резке осуществляется с помощью специальных струбцин.

Пробоподготовка в защитных камерах и лабораторных помещениях образцов различных конструкционных и топливных материалов реакторов до и после эксплуатации для материаловедческих исследований осуществляется с использованием комплекса шлифовально-полировальных станков. Технические параметры станков: скорость вращения – (40-600) об/мин., усилие – (10-50) Н, позволяют подбирать оптимальные условия для приготовления шлифов высокого качества. На специальном оборудовании обеспечивается горячая и холодная запрессовка образцов, в том числе в токопроводящую смолу для исследований в электронном микроскопе.

#### ***Проведение механических испытаний***

Комплекс внутрикамерных и лабораторных установок для определения механических свойств АО «ИРМ» позволяет решать следующие задачи:

- определение комплекса механических свойств в обоснование работоспособности ядерных энергетических установок;

- определяется влияния параметров облучения на характеристики механических свойств различных конструкционных материалов.

В Корпусе защитных камер проводятся:

- стандартные статические испытания с определением характеристик прочности, пластичности и трещиностойкости при температурах до 1600°C;

- определение ударной вязкости и температуры хрупко-вязкого перехода в диапазоне температур от минус 130 до плюс 500°C;

- определение микро- и макротвердости материалов по Виккерсу, Кнуппу, Бринеллю, Роквеллу, Супер-Роквеллу;

- высокочастотная резонансная машина TESTRONIC 20 кН позволяет выращивать усталостные трещины для испытаний на трещиностойкость и проводить испытания на скорость роста усталостной трещины при комнатной температуре;

- испытания на малоцикловую усталость при комнатной температуре позволяют определить угол изгиба, максимальный изгибающий момент и количество циклов нагружения до разрушения.

В АО «ИРМ» разработаны нестандартные, уникальные методики испытания тонкостенных оболочечных конструкций малого диаметра с расчетом не только стандартных характеристик механических свойств, но и напряженно-деформированного состояния при испытании, что дает более полную картину при анализе свойств материала. Это методики:

- испытание трубчатых образцов внутренним давлением пластичным твердым наполнителем;

- комплексная методика аксиального сжатия с последующим растяжением кольцевого образца;

- внецентренное растяжение сегментного образца.

## **Определение физических и физико-механических характеристик материалов**

При высокодозном нейтронном облучении происходит изменение структуры, фазового и микрохимического состава материалов, что может отразиться на физико-механических свойствах конструкционных материалов и их тепловом расширении. Для учета этих изменений в КЗК определяются:

- характеристики упругости материалов: модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона при температурах до 700°C;
- коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) облученных материалов в рабочем диапазоне температур от 30 до 1600 °С.

### **Проведение структурных исследований**

При проведении структурных исследований в АО «ИРМ» решаются следующие задачи:

- проведение микроструктурных исследований в области радиационного материаловедения и регламентного контроля состояния элементов АЗ ядерных реакторов;
- изучение механизмов радиационных повреждений и их воздействия на свойства материалов ядерных энергетических установок;
- исследование влияния длительного нейтронного облучения на изменение фазового состояния материалов;
- определение химического состава в локальных областях матрицы, вторых фаз и микрохимического состава образующихся при облучении новых фаз на границах и в теле зерна матрицы.

Для решения поставленных задач используется широкий набор структурных методов исследований, включающих оптическую металлографию и электронную микроскопию, рентгеновскую дифракцию и вторичную ионную масс-спектрометрию.

Для металлографических исследований используются оптические микроскопы, которые позволяют определять фракционный состав дисперсного топлива, оценивать объемную долю фаз, пористость, осуществлять анализ балла зерна.

Сканирующая электронная микроскопия, позволяет проводить фрактографические исследования разрушенных облученных и необлученных фрагментов изделий, определять характер разрушения, долю хрупкой и вязкой составляющей, выполнять анализ причин разрушения. С помощью СЭМ оценивается состояние поверхности образцов облученных и необлученных конструкций, дефекты, шероховатость, элементный состав включений, матрицы, отложений. Выполняется гранулометрия сыпучих материалов, определяется пористость прессованных изделий, керамики. Исследуется элементный состав.

Современный сканирующий просвечивающий электронный микроскоп TalosF200XG2 (Thermo Fisher) предназначен для проведения исследований микроструктуры материалов с атомным разрешением и энерго-дисперсионного анализа микрообъемов вещества.

Одним из этапов обновления экспериментальной базы структурных исследований в 2022 году стало приобретение сканирующего двулучевого электронно-ионного микроскопа ThermoFisherScientificHelios 5 CX (рисунок 1). Микроскоп предназначен для исследования различных конструкционных материалов, включая керамику и композитные материалы, получение карт распределения химических элементов и карт ориентаций

зерен. Микроскоп позволяет изготавливать кросс-секции (ламели) для анализа структуры материалов под поверхностью образца и изготовления в автоматическом или полуавтоматическом режиме высококачественных образцов для АЗТ и ПЭМ с нанометровой точностью позиционирования объектов интереса. Сканирующий микроскоп обладает разрешением электронной колонны не более 0,6 нм при ускоряющем напряжении 15 кВ, и разрешением ионной колонны не хуже чем 4 нм при ускоряющем напряжении 30 кВ. На микроскоп установлены наноманипулятор, для извлечения вырезанных ламелей, и система инжестирования газа для осаждения защитных слоев при вырезке ламели. Дополнительно микроскоп оснащен детектором энерго-дисперсионного анализа и детектором дифракции обратно отраженных электронов.



Рисунок 1 - Сканирующий двулучевой электронно-ионный микроскоп ThermoFisherScientificHelios 5 CX

Для проведения структурного и фазового анализа используются рентгеновские дифрактометры D8 Advance, D2 Phase, которые обеспечивают:

- качественный и количественный фазовый анализ конструкционных и топливных материалов реакторных установок;
- исследования изменений фазового состава в материалах с эффектом памяти формы при увеличении и снижении температуры;
- определение параметров кристаллической структуры материалов;
- анализ дефектов кристаллической структуры материалов, обусловленных нейтронным облучением;
- оценка текстуры конструкционных материалов;
- исследование кристаллической структуры и качества монокристаллов.

Для проведения работ по вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) применяется установка HidenMAXIMSIMSWorkstationHAL7 позволяющая определять изотопный состав твердых тел; измерять локальное выгорание поглощающих элементов ядерных реакторов на основе карбида бора; проводить аттестацию состава сырья для изотопного производства. Измерения в диапазоне от 1 до 300 а.е.м. с разрешающей способностью равной атомной массе изотопа.

Форма образца: порошок, шлиф, выпаренный осадок, металлы, полупроводники и неметаллы. Скорость травления до 10 мкм/ч. Экспресс-анализ на сколах образцов,

диаметр зонда 100 мкм, диапазон 0-90 % по изотопу  $^{10}\text{B}$  ( $\pm 0,5\%$ ). Картография и глубинное профилирование легких элементов в приповерхностных слоях конструктивных элементов ядерных реакторов - от  $\text{H}^1$  до  $\text{O}^{32}$ , диаметр кратера 50-100 мкм

### ***Проведение коррозионных испытаний и последующих коррозионных исследований***

Комплекс оборудования для испытаний на стойкость к коррозии позволяет решать следующие задачи:

- определение влияния облучения на скорость протекания коррозионных процессов;
- разработка прогнозных моделей в обоснование работоспособности элементов и конструкций объектов использования атомной энергии;
- определение склонности к коррозии в обоснование работоспособности перспективных материалов.

Коррозионные испытания исследуемых образцов конструктивных материалов проводится в сушильных шкафах ППО ШС 35/250-100. Рабочий диапазон температур составляет от 35 до 250°C с перепадом температур  $\pm 5$  °C, поддерживается по всему объему шкафа.

Определение массы исследуемых образцов до и после коррозионных испытаний проводится на лабораторных аналитических электронных весах CUBIS серии MSA 225P «SARTORIUS». Предел определения массы составляет 220 г. Пределы допускаемой абсолютной погрешности весов при измерении массы до 60 г составляет  $1 \cdot 10^{-5}$  г. В комплект весов MSA 225 P-000-DI «SARTORIUS» входит набор «SARTORIUS» YDK01 для определения плотности.

Измерение глубины и размеров питтингов, глубины и размеров очагов целевой коррозии исследуемых образцов и построение рельефа их поверхности выполняется с использованием конфокального лазерного измерительного микроскопа LEXT OLS5000.

### ***Проведение электрохимических исследований***

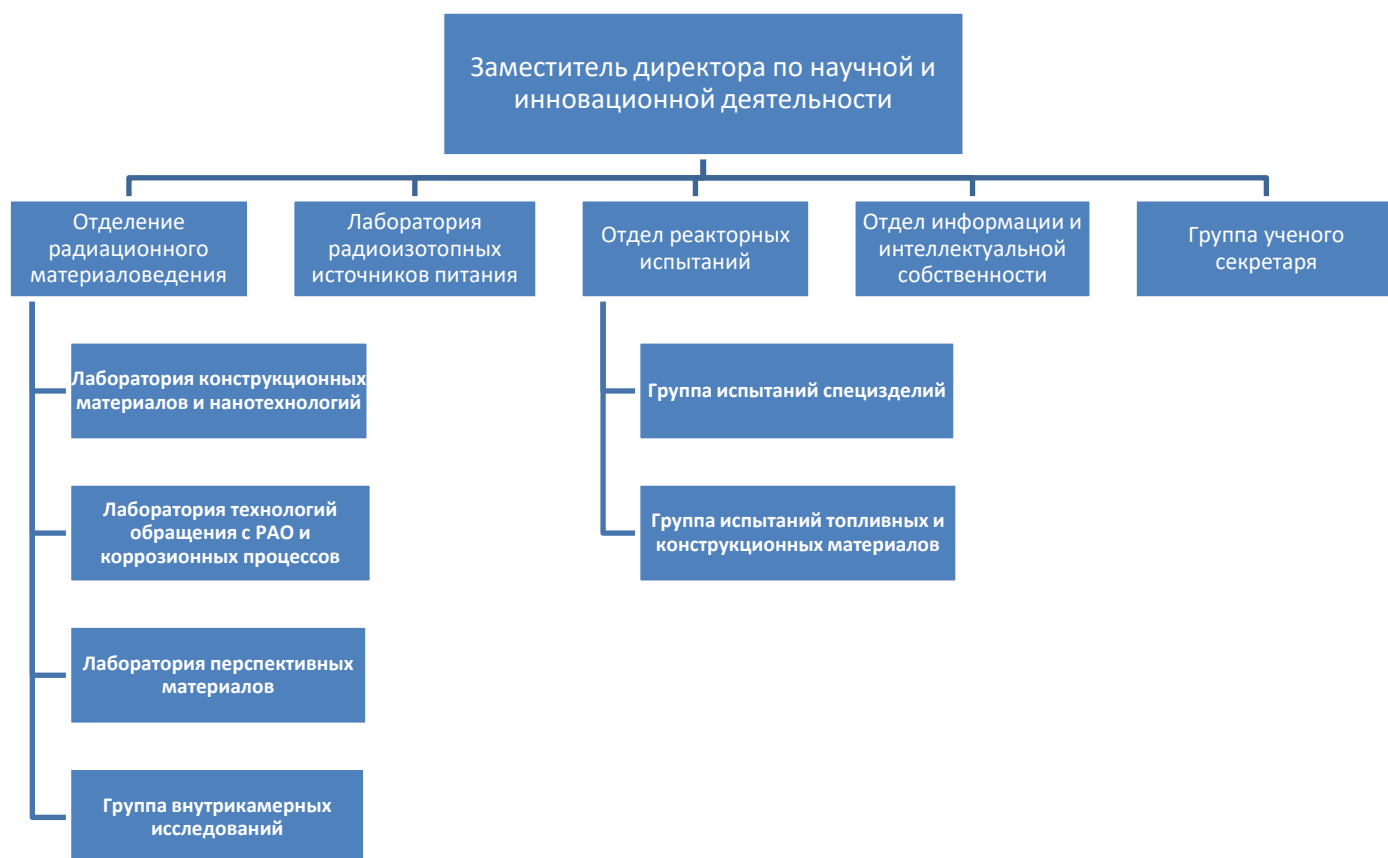
Электрохимические исследования проводятся с использованием электрохимической станции Zive MP2, представляющей собой высококачественный быстрый потенциостат, импедансметр и ZRA в одном компактном корпусе, с пятью независимыми каналами, содержащими по независимому источнику напряжения и тока. Источники напряжения и тока содержат цифроаналоговый преобразователь, формирующий профиль сигнала.

### ***Элементный анализ твердых и жидких проб***

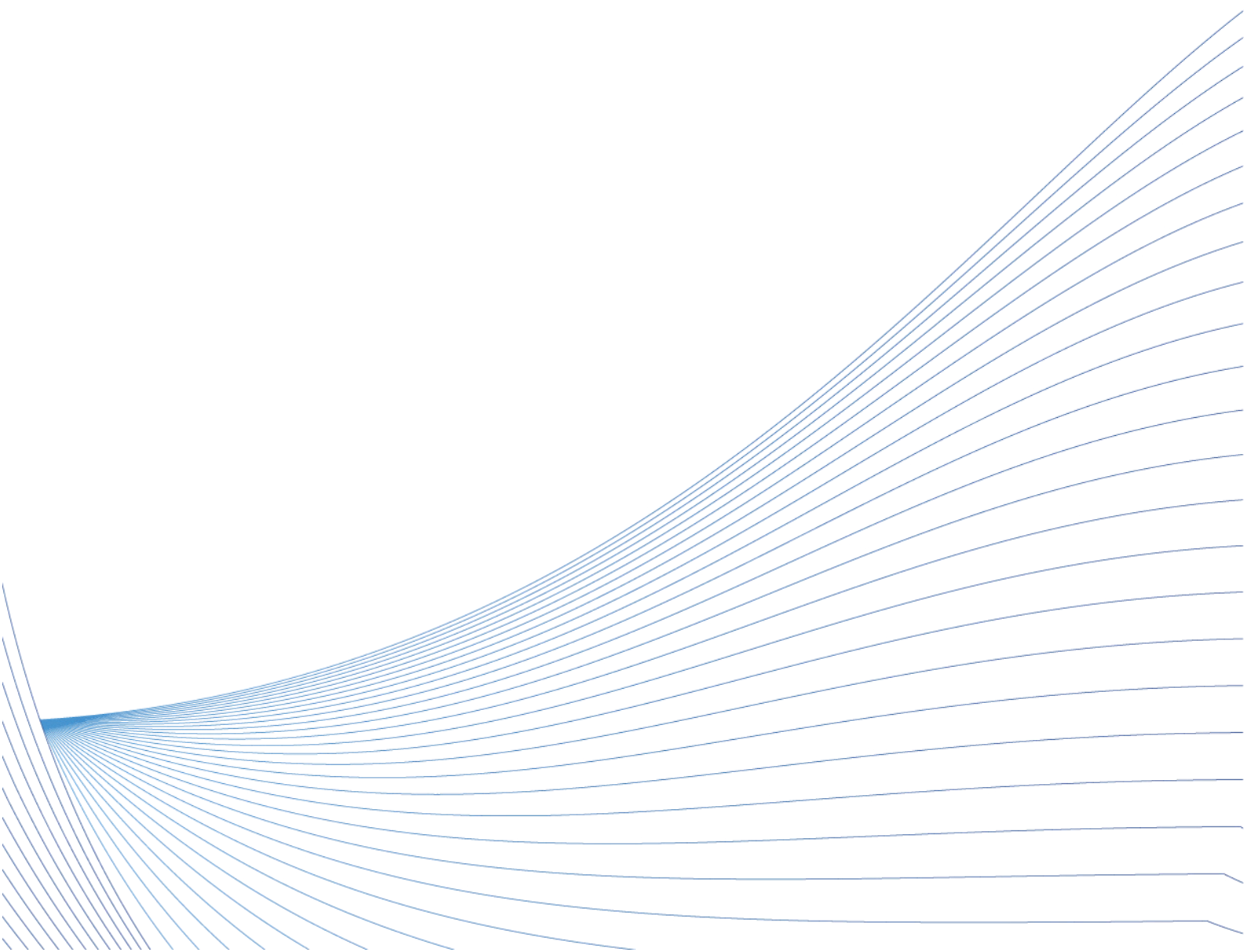
Для определения элементного состава образцов сталей, стекол, а также других конструктивных материалов, используется метод рентгенофлуоресцентного анализа. Рентгенофлуоресцентный анализ – высокоточный, быстрый и неразрушающий метод, с низкими пределами обнаружения (0.1 – 10 ppm) и высокой воспроизводимостью результатов.

Для проведения анализа применяется волновой рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL Perform'X с рентгеновской трубкой мощностью 4200 Вт. Прибор позволяет определять содержание элементов, входящих в состав твердых и жидких веществ, порошков, пленок и материалов по спектрам рентгеновской флуоресценции. Позволяет определять концентрации химических элементов от бериллия (Be) до урана (U).

## СТРУКТУРА НАУЧНОГО БЛОКА



# РЕЗУЛЬТАТЫ



## РЕАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В 2022 году в рамках НИОКР, с использованием реакторно-стендовой базы, проводились следующие работы:

- обоснование проектных решений реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) (РУ БРЕСТ-ОД-300, БР-1200);
- исследование кинетики выхода основных газообразных продуктов деления из образцов микротвэлов и топливных компактов высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, изготовленных на лабораторных установках.

### ***Свинцовая петлевая установка АО «ИРМ»***

Для обоснования проектных решений реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (РУ БРЕСТ-ОД-300, БР-1200) в АО «ИРМ» с 2018 года эксплуатируется реакторная петлевая свинцовая установка. Начиная с 2019 года в АО «ИРМ» проводятся эксперименты по исследованию влияния реакторного облучения на коррозионное поведение конструкционных сталей ЭП-823Ш и ЭП-302Ш в динамических условиях в свинце, содержащем кислород. В качестве коррозионной среды в установке используется жидкий свинец реакторной чистоты ТУ 1725-200-00194429-2015.

Свинцовая петлевая установка состоит из двух связанных между собой петлевых частей: газовой и жидкометаллической. Жидкометаллическая часть представляет собой замкнутый петлевой контур и состоит из экспериментального устройства и внереакторного контура циркуляции. Экспериментальное устройство размещается в активной зоне ИЯР ИВВ-2М. Конструкция экспериментального устройства обеспечивает сравнительное проведение испытаний образцов стали, расположенных в рабочих участках вне и в активной зоне реактора. Рабочий участок вне активной зоны, располагался на расстоянии ~0,5 метра выше от верха активной зоны реактора ИВВ-2М, а рабочий участок под облучением – в центральной области АЗ.

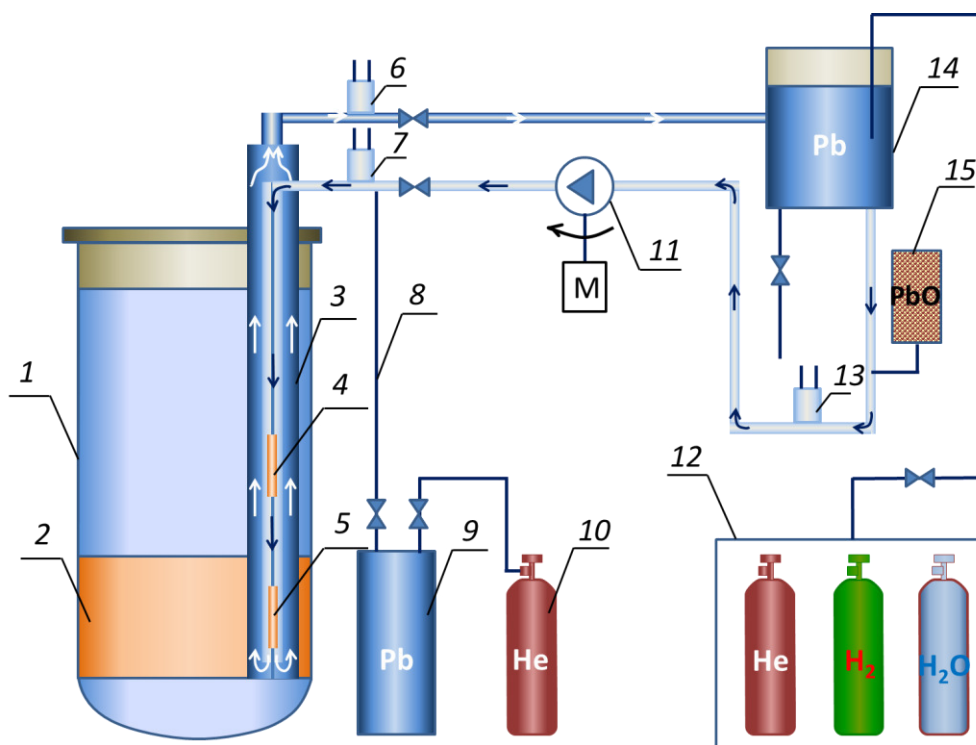
В проектах реакторов с ТЖМТ для защиты сталей от агрессивного воздействия свинца предполагается вводить кислород на уровне  $(1-4) \cdot 10^{-6}$  мас. %. Петлевая свинцовая установка имеет систему контроля и регулирования концентрации растворенного кислорода в свинце. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 2.

В 2022 году в рамках НИОКР по контракту, заключенному с АО «НИКИЭТ», проведена подготовка экспериментального устройства (далее – ЭУ) «Урал-коррозия».

В качестве мер по предупреждению аварийных и нештатных ситуаций проведена модернизация реакторной петлевой свинцовой установки и ЭУ, а также проведены следующие организационно-технические мероприятия:

- 1) Проведено усиление контроля качества сборки ЭУ – увеличено количество и качество этапов дореакторных испытаний всех элементов ЭУ до загрузки в ИЯР;
- 2) Установлена защита от протечек свинца на оголовки ЭУ и подводящие трассы;
- 3) Установлена система контроля протечки свинца;
- 4) Установлена система звуковой и визуальной сигнализации на пульте оператора в случае утечки свинца в защитный кожух или уменьшения уровня теплоносителя в компенсаторе объема;
- 6) Сотрудниками АО «ИРМ» освоены современные программные средства, моделирующие теплоперенос. Скорректированы теплофизические расчеты ЭУ «Урал-коррозия». Выявлены проблемные участки ЭУ, внесены конструктивные изменения данных участков;





1 – корпус реактора; 2 – активная зона; 3 – экспериментальное устройство; 4 – образцы вне активной зоны; 5 – образцы в активной зоне; 6 – датчик активности кислорода на выходе из ЭУ; 7 – датчик активности кислорода на входе в ЭУ; 8 – капиллярная трубка; 9 – дренажная емкость; 10 – газовый баллон; 11 – жидкометаллический насос; 12 – система поддержания газовой среды; 13 – ДАК на выходе из массообменника; 14 – компенсатор; 15 – массообменник

Рисунок 2 – Схема и основные элементы свинцовой петлевой установки для проведения реакторных коррозионных испытаний образцов стали

7) Разработана и экспериментально обоснована новая технология монтажа электрообогревающих элементов. Произведено дублирование и резервирование всех нагревательных элементов по принципу «единичного отказа»;

8) Смонтирована и отработана газовакуумная система стенда для точного поддержания требуемой температуры образцов в районе активной зоны ЭУ;

9) Из заготовок, представленных АО «НИКИЭТ», сварных соединений аустенитной стали ЭП-302Ш для проведения коррозионных испытаний и исследований коррозионного поведения в условиях реакторного облучения и вне активной зоны реактора произведена вырезка и подготовка следующих типов образцов:

- 20 шт. из зон сварного шва (СШ), зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ) для проведения исследований методами оптической металлографии, сканирующей электронной микроскопии, микронзондового рентгеноспектрального анализа и определения показателей коррозии с использованием «геометрического» способа;

- 8 шт. из основного металла для отработки технологии удаления остатков свинца и продуктов коррозии, а также отработки технологии определения показателей коррозии «гидростатическим» способом;

- 18 шт. (8 шт. СШ+ЗТВ+ОМ, 10 шт. ОМ) для определения показателей коррозии «гидростатическим» и «гравиметрическим» способами;

10) Произведена подготовка образцов для проведения коррозионных испытаний, включающая измерение размеров, определение массы и плотности, фотографирование внешнего вида;

11) Выполнена сборка двух навесок с образцами стали ЭП-302Ш: одна для испытаний в условиях вне облучения, другая - для испытаний в активной зоне реактора.

*Е.В. Шабельников, О.А. Голосов, С.С. Хвостов,  
А.А. Осинцева, Н.В. Глушкова*

## МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### **Методические аспекты способов, используемых в АО «ИРМ», для определения показателей коррозии сталей в свинце, содержащем кислород**

На протяжении многих лет проведения исследований коррозионного поведения различных конструкционных материалов (алюминиевые сплавы, перлитные углеродистые стали, сплавы циркония, ферритно-мартенситные и аустенитные хромоникелевые стали, высоконикелевые и ниобиевые сплавы) в АО «ИРМ» накоплен опыт определения показателей коррозии этих материалов в разных коррозионных средах (вода, пароводяная смесь, перегретый пар и кислородсодержащие газовые смеси). Для определения показателей коррозии этих материалов в зависимости от состава коррозионной системы «КМ-коррозионная среда» использовался свой набор методов, позволяющих определять наиболее достоверные значения показателей коррозии КМ.

Для сплавов алюминия, у которых помимо образования оксидных пленок, наблюдается достаточно высокий процент выноса продуктов коррозии в воду (до ~50 % в пересчете на металл). Кроме того, у этих материалов наблюдаются так называемые «лобовой» и «хвостовой» эффекты утонения образцов в высокоскоростных потоках водного теплоносителя. «Лобовой» эффект обусловлен утонением образцов в результате эрозионного воздействия набегающего потока воды, а «хвостовой» - связан с турбулизацией потока воды в результате срыва последнего с поверхности образца в его концевой части. Оба этих эффекта приводят к неравномерному утонению образца по его длине. Поэтому применение гравиметрических методов определения показателей коррозии является неприемлемым для сплавов алюминия. Наиболее приемлемым для них являлся так называемый «геометрический» метод, основанный на определении геометрических размеров (толщины) образцов до и после коррозионных испытаний, а также толщины оксидной пленки [1]. Эти данные позволяют определять весь набор необходимых показателей коррозии (общие коррозионные потери металла, глубину коррозии, толщину оксидной пленки, вынос продуктов коррозии в воду).

Для характеристики коррозии сплавов циркония в оксидных средах на допереломной стадии окисления является способ, основанный на определении увеличения массы образцов [2], так называемый положительный гравиметрический.

Для перлитных углеродистых, ферритно-мартенситных и аустенитных хромоникелевых сталей наиболее приемлемым является отрицательный гравиметрический способ, основанный на определении убыли массы образцов с полным удалением продуктов коррозии с их поверхности. Этот метод позволяет определять весь набор необходимых показателей коррозии вышеуказанных материалов (общие коррозионные потери металла, глубину коррозии, толщину оксидной пленки, вынос продуктов коррозии в воду) [3].

Для исследования коррозионного поведения высоконикелевых сплавов в перегретом паре в АО «ИРМ» использовался отрицательный гравиметрический способ, а также так называемый «гидростатический» метод, основанный на измерении массы и плотности образца до и после коррозионных испытаний [4].

Отличительной особенностью коррозионного поведения сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (ТЖМТ), содержащих кислород, является сложная зависимость образования продуктов коррозии (ПК) от температуры, скорости потока и

содержания кислорода в ТЖМТ, приводящая к возможности образования одно- или двухслойных оксидных пленок, их скалывания в результате накопления напряжений, растворения (диссоциации) с последующим массопереносом растворимых ПК.

На рисунке 3 приведена диаграмма, характеризующая устойчивость оксидных фаз основных элементов, входящих в состав сталей, в зависимости от температуры и содержания кислорода. Там же нанесена область, соответствующая параметрам эксплуатации оболочек твэлов РУ БРЕСТ-ОД-300: по температуре от 420 до 650 °С и по содержанию кислорода от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $4 \cdot 10^{-6}$  масс. %.

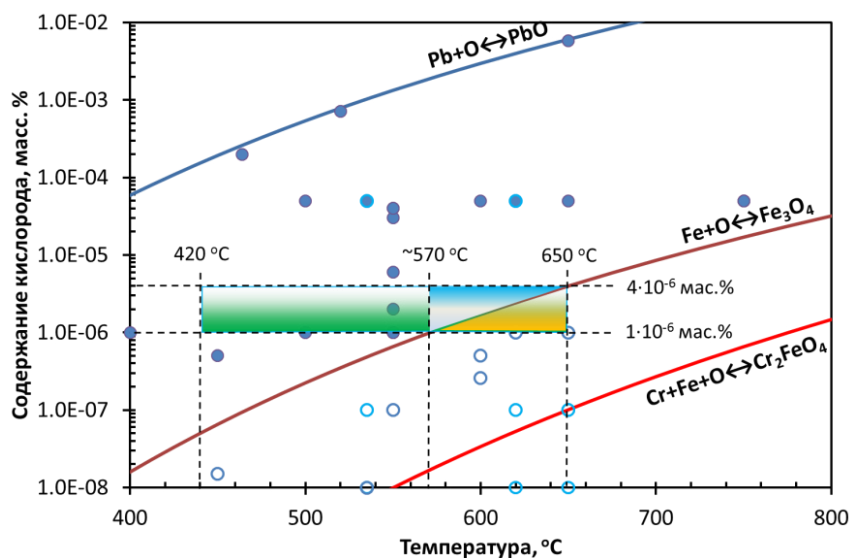


Рисунок 3 - Диаграмма, характеризующая устойчивость оксидных фаз основных элементов, входящих в состав сталей, в зависимости от температуры и содержания кислорода: залитые круги соответствуют двухслойным оксидным пленкам из  $Fe_3O_4$  и  $Cr_2FeO_4$ ; незалитые круги соответствуют однослойным оксидным пленкам из  $Cr_2FeO_4$

Согласно этим данным на поверхностях оболочек твэлов с температурой до  $\sim 570$  °С возможно образование двухслойной оксидной пленки, состоящей из магнетита  $Fe_3O_4$  и железо-хромистой шпинели  $Cr_2FeO_4$ .

При температуре  $> \sim 570$  °С в зависимости от содержания кислорода на поверхности оболочек твэлов возможно образование двух областей, условно представляющих собой треугольную форму. В нижнем треугольнике с координатами вершин ( $570$  °С- $1 \cdot 10^{-6}$  масс. %) - ( $650$  °С- $1 \cdot 10^{-6}$  масс. %) - ( $650$  °С- $4 \cdot 10^{-6}$  масс. %) возможно образование только однослойной оксидной пленки из  $Cr_2FeO_4$ . В верхнем треугольнике с координатами вершин ( $570$  °С- $1 \cdot 10^{-6}$  масс. %) - ( $570$  °С- $4 \cdot 10^{-6}$  масс. %) - ( $650$  °С- $4 \cdot 10^{-6}$  масс. %) возможно образование двухслойной оксидной пленки, состоящей из  $Fe_3O_4$  и  $Cr_2FeO_4$ .

Из анализа литературных данных по исследованию коррозии сталей в ТЖМТ, опираясь только на данные определения толщины оксидных пленок можно прийти к парадоксальным выводам, что коррозия стали в свинце, содержащем кислород, практически отсутствует или находится на одном уровне в течение длительного времени. Такие выводы сделаны авторами работы [5], на основании своих данных, полученных при исследовании ферритно-мартенситной стали ЭП-823Ш в потоке свинца с температурой  $610-625$  °С и концентрацией кислорода  $(1-4) \cdot 10^{-6}$  масс. % в течение испытаний от 1000 до 16672 ч. Результаты этой работы можно рассматривать как «классический» пример, подтверждающей недостаточность получаемой информации о коррозионном поведении сталей в ТЖМТ, опираясь только на измерениях толщины оксидной пленки.

На рисунке 4 приведены результаты анализа полученных в работе [5] данных с объяснением возможных причин своеобразного изменения толщины оксидной пленки в ходе проведения эксперимента. Во-первых, область для проведения эксперимента ( $T=610-625$  °С и  $[C_O]=(1-4) \cdot 10^{-6}$  масс. %) была выбрана некорректно. Так, согласно

данным, область проведения эксперимента своей центральной частью строго попадает на границу равновесия  $\text{Fe}+\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ , приводя тем самым к делению ее на две подобласти с разными условиями по механизмам протекания коррозии стали в свинце, содержащем кислород. В верхней части коррозия протекает с образованием двухслойной оксидной пленки, состоящей из магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и железо-хромистой шпинели  $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ , а в нижней - коррозия протекает с образованием однослойной оксидной пленки из шпинели  $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$  с одновременным растворением (диссоциацией) слоя магнетита, образовавшегося при нахождении стали в верхней области испытаний.

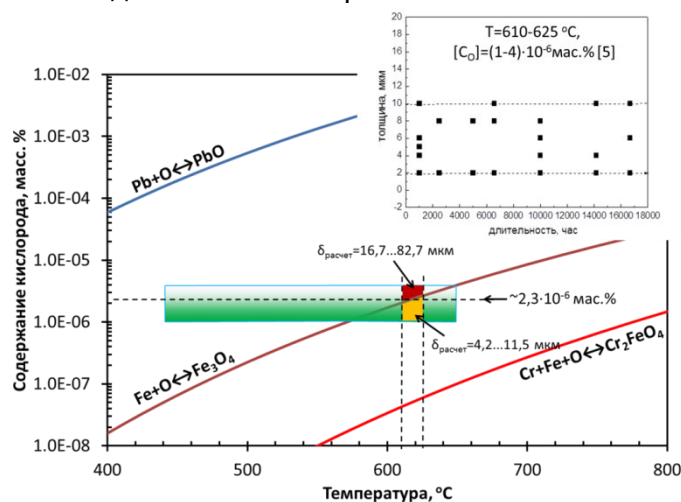


Рисунок 4 - Анализ данных работы [4] с учетом термодинамической стабильности оксидов  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$  в системе  $\text{Pb}-\text{O}$

Избежать таких вариантов развития коррозионных процессов авторам работы [5] было практически невозможно, так как используемые ими при планировании эксперимента диаграммы Эллингема, являясь механистическим совмещением двух диаграмм, не дают четкого разграничения по границам областей существования оксидных фаз в зависимости от температуры и содержания кислорода.

Во-вторых, если бы сталь ЭП-823Ш находилась в процессе эксперимента в диапазоне концентраций кислорода то  $\sim 2,3 \cdot 10^{-6}$  до  $4 \cdot 10^{-6}$  масс. % то на ее поверхности (в соответствии с расчетами по эмпирической модели коррозии [6]) при  $T=610-625$  °C сформировалась бы двухслойная оксидная пленка с монотонно возрастающей толщиной от  $\sim 16,7$  мкм после 1000 часов до  $\sim 82,7$  мкм к концу 16772 ч испытаний (рис. 2). А так на поверхности стали фиксировалось наличие оксидной пленки переменной толщины от 2 до 10 мкм, значения которых хорошо коррелируют с данными расчетов по той же эмпирической модели коррозии [6], которые находятся в пределах от  $\sim 4,2$  до 11,5 мкм. Таким образом, отсутствие в работе [5] средневзвешенных значений параметров испытаний (приводятся только диапазоны по температуре и содержанию кислорода), не позволяет четко соотнести к какой области испытаний соответствуют экспериментальные данные.

При проведении исследований влияния реакторного облучения на коррозию ферритно-мартенситной стали ЭП-823Ш для полной характеристики ее коррозионного поведения в АО «ИРМ» используются три основных способа, способных определять все показатели коррозии. Это так называемые способы: гравиметрический, гидростатический и геометрический. Традиционно используемый в литературе металлографический способ автоматически используется в АО «ИРМ» при выполнении геометрического способа. Краткая характеристика технологических операций, выполняемых при использовании каждого метода, приведена в таблице 1. Там же приведен перечень показателей коррозии, определяемых каждым способом.

Согласно данным таблицы 1, менее трудоемким является металлографический способ, так как из 11 технологических операций, необходимых для проведения исследований по всем способам, требуется только две: подготовка металлографического шлифа и измерение толщины оксидной пленки. Однако этот способ позволяет определять только два показателя коррозии - толщину оксидной пленки и глубину проникновения слоя внутреннего окисления. С его помощью можно оценивать коррозионные потери металла и глубину коррозии, однако они будут иметь заниженные значения по причине выноса части ПК в ТЖМТ и скола оксидных пленок. Способ не позволяет оценивать вынос ПК в ТЖМТ.

Гидростатический, гравиметрический и геометрический способы являются более трудоемкими и сложными, так как при их использовании потребуется от 5 до 6 технологических операций из 11, необходимых для проведения исследований по всем способам. Для гидростатического и гравиметрического способов требуется удаление остатков свинца с поверхности образцов до приемлемого уровня. Кроме того, при использовании гравиметрического способа необходимо поэтапное удаление продуктов коррозии с поверхности образцов химическим способом без воздействия на металлическую основу.

Для геометрического способа не требуется удаление остатков свинца с поверхности образцов, однако требуется изготовление металлографических шлифов до и после коррозионных испытаний и измерение размеров образцов, толщины слоев оксидной пленки и слоя внутреннего окисления с равномерным шагом по всему периметру (кольцевого) или по длине прямоугольного образца.

Геометрический способ позволяет определять весь набор показателей коррозии, необходимых для полной характеристики протекания коррозионных процессов сталей в ТЖМТ. При использовании гравиметрического и гидростатического способов можно определять практически весь набор показателей коррозии, за исключением определения толщины слоя внутреннего окисления (ВО). Однако его значения частично учитываются в обоих случаях (в гидростатическом способе за счет разницы в плотностях металла и оксидов ВО, в гравиметрическом - за счет их растворения оксидов). Геометрический и гравиметрический способы являются разрушающими, а гидростатический способ не приводит к повреждению образцов и они могут быть использованы для дальнейших испытаний или исследований.

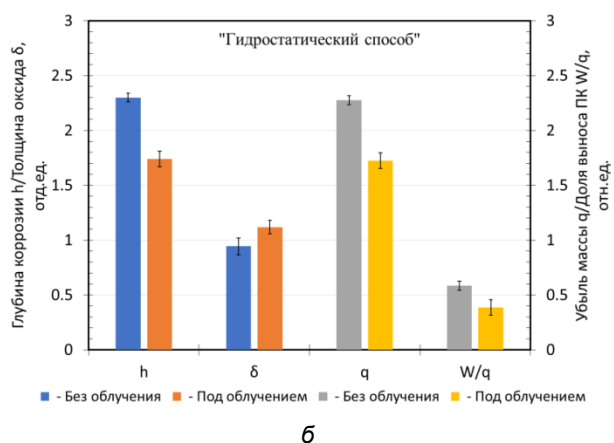
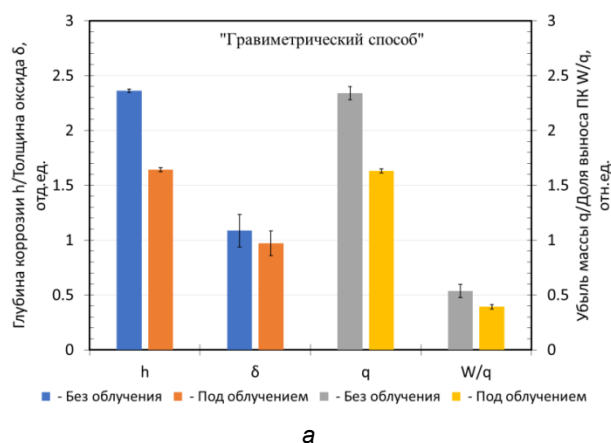
Таблица 1 - Характеристика технологических операций, выполняемых при использовании каждого метода, и перечень определяемых показателей коррозии

Состояние	Вид операций / показатели коррозии	Металло-графический	Гидростатический	Гравиметрический	Геометрический
До испытаний	Определение массы	-	+	+	-
	Определение размеров	-	+	+	+
	Подготовка шлифа	-	-	-	+
	Определение плотности	-	+	-	-

Продолжение таблицы 1 - Характеристика технологических операций, выполняемых при использовании каждого метода, и перечень определяемых показателей коррозии

После испытаний	Удаление свинца	-	+	+	-
	Определение массы	-	+	+	-
	Удаление ПК	-	-	+	-
	Определение размеров	-	-	-	+
	Подготовка шлифа	+	-	-	+
	Определение плотности	-	+	-	-
	Измерение толщины оксида	+	-	-	+
Определяемые показатели коррозии	Коррозионные потери металла	-	+	+	+
	Глубина коррозии	-	+	+	+
	Толщина ПК	+	+	+	+
	Вынос ПК	-	+	+	+
	Толщина слоя внутреннего окисления	+	-	-	+

Все три способа (гидростатический, гравиметрический и геометрический) имеют хорошую сходимость определения показателей коррозии, о чем свидетельствуют данные исследований образцов стали ЭП-823Ш, испытанных в течение 1113 ч при  $570 \pm 10$  °С в потоке свинца с содержанием кислорода  $(1,8-3,0) \cdot 10^{-6}$  масс.% в реакторных и вне реакторных условиях (рисунок 5, данные приведены в относительных единицах, в которых за базовые значения приняты данные, полученные металлографическим способом).



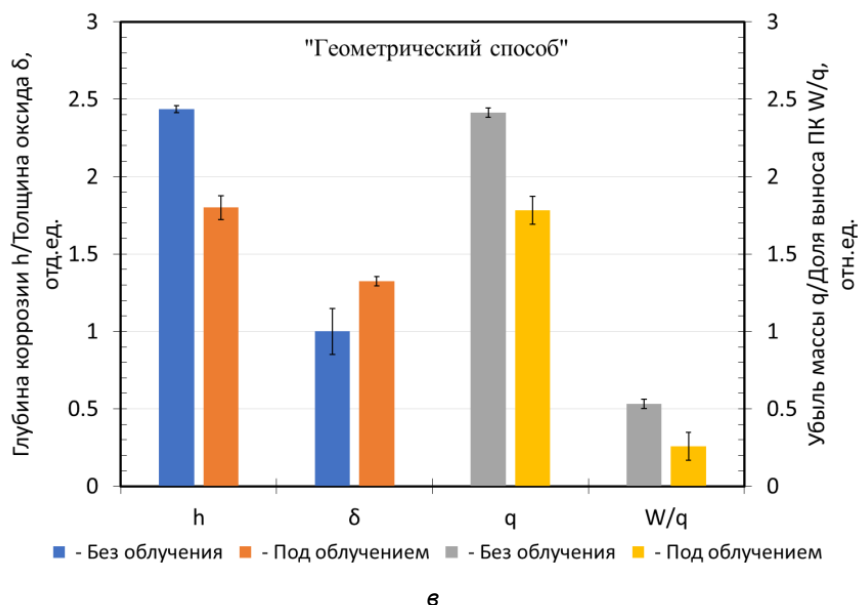


Рисунок 5 - Результаты определения различными способами показателей коррозии стали ЭП-823Ш, испытанной в течение 1113 ч при  $570 \pm 10$  °С в потоке свинца с содержанием кислорода  $(1,8-3,0) \cdot 10^{-6}$  масс.% в реакторных и вне реакторных условиях

О.А. Голосов, С.С. Хвостов,  
Н.В. Глушкова, А.А. Осинцева

### Неразрушающий способ определения показателей коррозии сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях

В соответствии с данными анализа литературных данных в ~87 % основным методом исследования коррозионного поведения сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (ТЖМТ) является так называемый «металлографический» метод, основанный на измерении толщины оксидных пленок после проведения коррозионных испытаний (рисунок 6).

Суть этого метода заключается в подготовке металлографических шлифов в поперечном сечении образцов, подвергнутых коррозионным испытаниям, без удаления с их поверхности остатков ТМЖТ, в измерении толщины оксидных пленок и их составных частей, в изучении их структуры и состава. Основными преимуществами способа является его относительная простота, так как не требуется удаления с поверхности образцов ни остатков ТМЖТ, ни оксидных пленок, а требуется только

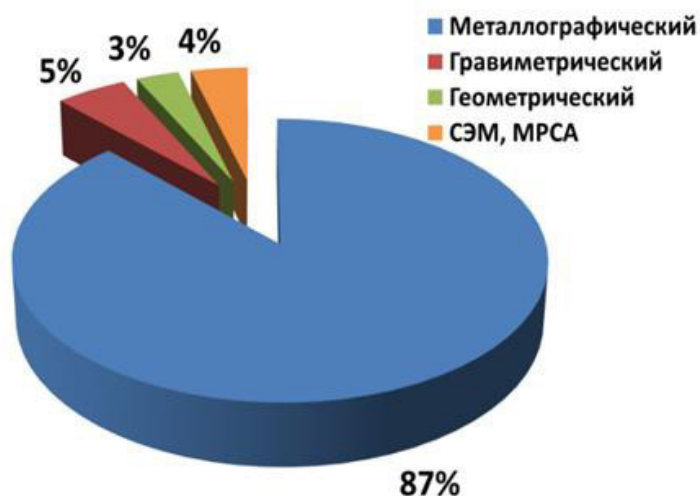


Рисунок 6 - Диаграмма, характеризующая в %-ном отношении использование методов исследования коррозии сталей в ТЖМТ

качественная подготовка металлографических шлифов. Кроме того, он позволяет проводить исследования структурного состояния оксидных пленок методами оптической металлографии и растровой электронной микроскопии и определения их элементного состава методами микрозондового рентгеноспектрального анализа. Недостатками способа являются: его локальность (исследование образцов только в определенном сечении), необходимость знания фазового состава и плотности оксидных пленок при проведении расчетов по оценке глубины проникновения коррозии в металл, невозможность определения выноса продуктов коррозии сталей в ТМЖТ в процессе коррозионных испытаний. Металлографический способ применим только в случае отсутствия скола оксидных пленок с поверхности образцов в процессе коррозионных испытаний или диссоциации оксидов, входящих в состав формирующихся на поверхности образцов оксидных пленок.

В ~5 % коррозионных исследований используется так называемый «гравиметрический» метод, определения показателей коррозии сталей в ТМЖТ, который основан на определении убыли массы образцов после коррозионных испытаний. В этом случае требуется полное удаление остатков ТМЖТ с поверхности образцов, а также слоя (слоев) оксидных пленок, сформировавшихся на поверхности образцов в процессе коррозионных испытаний, химическими методами без воздействия на металлическую подложку. Основными преимуществами этого способа является возможность определения всех показателей коррозии, таких как убыль массы (общие коррозионные потери металла), средней глубины проникновения коррозии в металл, средних значений толщины оксидной пленки, выноса продуктов коррозии в ТМЖТ, позволяющих полностью характеризовать коррозионное поведение сталей в ТМЖТ. Гравиметрический способ также имеет и недостатки, которыми являются необходимость полного удаления продуктов коррозии с поверхности образцов и необходимость подбора химических травильных растворов, оказывающих минимальное воздействие на металлическую подложку.

Согласно рис. 6 в 3 % коррозионных исследований применяется так называемый «геометрический» метод определения показателей коррозии сталей в ТМЖТ, который основан на измерении толщины металла образцов до и после коррозионных испытаний, а также толщины оксидных пленок. «Геометрический» метод также требует подготовки металлографических шлифов на образцах, подвергнутых коррозионным испытаниям, при этом желательно в сечении, в котором проводились измерения толщин образцов до начала коррозионных испытаний. Этому способу присущи те же преимущества, что и первому металлографическому способу. Помимо этого, третий способ позволяет определять все показатели коррозии и измерять глубины слоев внутреннего окисления и глубину локальных видов коррозии.

В остальных ~4 % исследований использовались методы сканирующей электронной микроскопии и микрозондового рентгеноспектрального анализа без определения показателей коррозии.

Все эти способы являются разрушающимися, приводящими к необратимому повреждению исследуемых образцов.

В АО «ИРМ» разработан новый неразрушающий способ определения показателей коррозии сталей в ТМЖТ. Способ основан на различиях в плотности металлической основы сталей  $\rho_{Me}$  и плотности оксидных пленок  $\rho_{ок}$ , образующихся на их поверхности в окислительных средах и заключается в измерении массы и плотности образцов до и после коррозионных испытаний.

Определение основных показателей коррозии производится по следующим выражениям:



- убыль массы (общие коррозионные потери металла)

$$\Delta m = S^{-1} \cdot \left[ m_0 - \frac{m_1 \cdot \rho_{Me} \cdot (\rho_{ок} - \rho_{ср})}{\rho_{ср} \cdot (\rho_{ок} - \rho_{Me})} \right], (1)$$

- средние значения глубины проникновения равномерной коррозии в металл

$$l = S^{-1} \cdot \rho_{Me}^{-1} \cdot \left[ m_0 - \frac{m_1 \cdot \rho_{Me} \cdot (\rho_{ок} - \rho_{ср})}{\rho_{ср} \cdot (\rho_{ок} - \rho_{Me})} \right], (2)$$

- средние значения толщины оксидной пленки

$$\delta = \frac{m_1 \cdot \rho_{Me} \cdot (\rho_{Me} - \rho_{ср})}{S \cdot \rho_{ср} \cdot \rho_{ок} \cdot (\rho_{Me} - \rho_{ок})}, (3)$$

- вынос продуктов коррозии в коррозионную среду (в пересчете на металл)

$$W = S^{-1} \cdot \left\{ m_0 - \frac{m_1 \cdot \rho_{Me}}{\rho_{ср}} \cdot \left[ \frac{\rho_{ок} - \rho_{ср}}{\rho_{ср} - \rho_{Me}} - \frac{n \cdot A}{M} \cdot \frac{(\rho_{Me} - \rho_{ср})}{(\rho_{Me} - \rho_{ок})} \right] \right\}, (4)$$

где  $m_0$  и  $m_1$  - масса образца до и после коррозионных испытаний, соответственно;  $S$  - площадь поверхности образца;  $\rho_{Me}$  - плотность образца до испытаний;  $\rho_{ср}$  - средняя плотность образца после испытаний,  $\rho_{ок}$  - измеренная или табличные значения плотности оксидной пленки;  $n$  - число атомов металла в молекуле оксида;  $A$  - атомная масса металла;  $M$  - молекулярная масса оксида.

Способ защищен патентом РФ № 2794066 и опубликован 11.04.2023 г. в бюллетене № 11.

Отличительной особенностью разработанного нового гидростатического способа от прототипа является введение дополнительной операции, заключающейся в удалении после коррозионных испытаний остатков свинца с поверхности образцов до приемлемого уровня (с точки зрения точности определения показателей коррозии). Содержание Pb в оксидной пленке на поверхности образцов в соответствии с формулой изобретения не должно превышать 2 масс. %.

В таблице 2 приведена сравнительная характеристика показателей коррозии стали ЭП-823Ш, полученных разными методами, после коррозионных испытаний в потоке Pb $\vartheta$ =0,2-0,3 м/с с содержанием кислорода [C<sub>O</sub>]= (1,8 - 3,0)·10<sup>-6</sup>мас. % при 570±10 °С в течение t=1502 ч.

Таблица 2 - Сравнительная характеристика показателей коррозии стали ЭП-823Ш, полученных разными способами, при испытаниях в потоке Pb (T=570±10 °С, t=1502 ч, [C<sub>O</sub>]= (1,8 - 3,0)·10<sup>-6</sup>мас. %, V=0,2-0,3 м/с)

Способ	Убыль массы*, отн.ед.	Глубина коррозии*, отн.ед.	Толщина оксида*, отн.ед.	Вынос ПК (в пересчете на металл), в%от убыли массы
Металлографический	1,00 ± 0,15	1,00±0,15	1,00±0,15	-
Гравиметрический	2,34 ± 0,04	2,36 ±0,04	1,09 ± 0,16	54±6
Геометрический	2,41 ± 0,05	2,42 ± 0,25	1,00 ± 0,15	53±2
Гидростатический	2,28 ± 0,09	2,29 ± 0,09	0,95 ± 0,07	58±3

\* - В относительных единицах по отношению к базовому способу, за который принят металлографический способ

Согласно данным таблицы 2 «гравиметрический», «геометрический» и «гидростатический» методы позволяют определять все показатели коррозии и имеют хорошую сходимости при определении их значений. В то время как «металлографический» метод имеет хорошую сходимости только при определении толщины оксидной пленки и дает почти в 2,3-2,4 раза заниженные значения при определении величин убыли массы и глубины коррозии, и не позволяет рассчитывать вынос продуктов коррозии (ПК) в свинец.

Как отмечалось выше, «гравиметрический» и «геометрический» способы являются разрушающими, что не позволяет повторное использование образцов для проведения коррозионных испытаний. В то время как «гидростатический» способ является неразрушающим и сохраняет в целостности образец и оксидную пленку на его поверхности, что позволяет использование образца для дальнейших коррозионных испытаний и получению кинетической зависимости коррозии на ограниченном количестве образцов и за более короткое время.

Авторы статьи рекомендуют использование «гидростатического» способа для определения показателей коррозии статей в ТЖМТ.

*О.А. Голосов, С.С. Хвостов, А.А. Осинцева*

### ***Работы в обоснование увеличения ресурса КС СУЗ БН-600 до 800 эфф. суток***

Завершены материаловедческие исследования пэлов стержня КС реактора БН-600 со штатным ресурсом 592 эффективных суток. Металлографический анализ показал надежность сварного соединения оболочки пэлов с нижней заглушкой. Герметичность сварного шва, расположенного в зоне максимального воздействия нейтронного потока, сохраняется в условиях начальной стадии радиационного набухания оболочки на уровне 3 % и сопутствующего механического воздействия по храповому механизму со стороны растрескивающихся вкладышей поглотителя нейтронов на основе карбида бора природного обогащения.

Показано, что аномальный храповой механизм деформации нижней части оболочки пэлов возникает в результате неизбежной эксплуатационной фрагментации и множественного растрескивания вкладышей поглотителя. В условиях умеренного (до 13 % на конец эксплуатации) общего радиационного набухания, не представляющего, по расчетам, опасность выбора технологического зазора, и наличии натриевого подслоя многочисленные осколки твердого поглотителя испытывают необратимый (расклинивающий) взаимный разворот с поэтапной фиксацией относительно друг друга. Изменения реакторной мощности сопровождаются температурными градиентами, расширением и сужением материала оболочек. На стадии расширения фрагменты поглотителя образуют жесткий каркас внутри свободного пространства; при охлаждении оболочка осаживается на каркас, получая аномальную механическую деформацию (не менее 1 %) в виде беспорядочной визуально наблюдаемой бугристости и рост внутренних микронапряжений. После 592 эффективных суток полная окружная деформация штатного материала оболочки ещё не является критической для разрушения, однако перспективы увеличения ресурса требуют контроля храповика поглотителя на финише облучения.

В ходе проведенных исследований впервые получены данные о физико-механических свойствах облученного карбида бора. Предел хрупкой прочности исследованных вкладышей, испытавших набухание выше 9 % вблизи нижней заглушки, составил не менее 500 МПа при 500 °С. С удалением от нижней части пэлов набухание и растрескивание вкладышей уменьшаются пропорционально характеру выгорания изотопа  $^{10}\text{B}$  (рисунок 7), а предел прочности достигает 800 МПа при 650 °С. Коэффициент

температурного линейного расширения в продольном направлении верхних вкладышей столба поглотителя составил  $(7-9) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  в интервале 25–1400 °С.

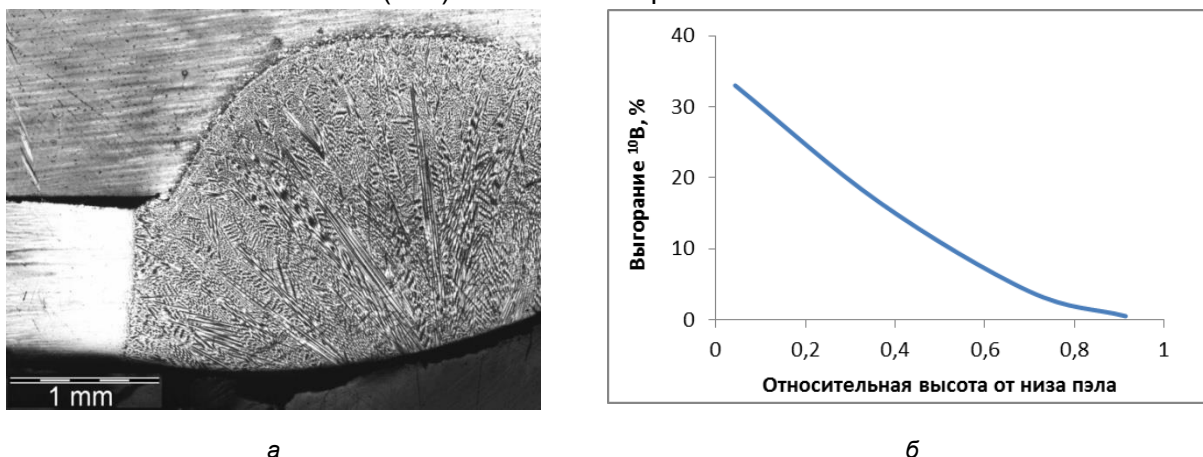


Рисунок 7 – Структура нижнего сварного шва (а) и аксиальный характер выгорания материала поглотителя (б) пэла

Комплекс выполненных исследований подтвердил работоспособность пэлов исследованного КС после достигнутого выгорания и позволил АО «ОКБМ Африкантов» подготовить программу работ на увеличенный ресурс испытания в течение 752 эфф. суток, максимально приближенный к целевому сроку 800 эфф. суток в составе АЗ 01М4 реактора БН-600.

*Е.А. Кинёв, М.В. Евсеев, А.Г. Нежданов, К.Н. Ладейщиков*

#### **Исследование стали ЭП450, облученной в реакторе БН-600 в составе материаловедческой сборки МС-2.**

Исследования проводили с целью получения дополнительных экспериментальных данных по послереакторным свойствам чехловой трубы выемного контейнера (ВК-2), облученного в реакторе БН-600 в составе ТВСМ-2 до максимальной повреждающей дозы ~145 сна. Полученные дополнительные экспериментальные данные необходимы для обоснования постановки материаловедческой сборки с образцами из ферритно-мартенситных сталей в активную зону реактора БН-600 для облучения до более высоких повреждающих доз.

В условиях защитных камер и лабораторий АО «ИРМ» выполнен комплекс работ, включающий следующие виды исследований:

– анализ результатов неразрушающих исследований, подготовка схемы вырезки образцов для исследований чехловой трубы с координатной привязкой к данным по максимальному значению повреждающей дозы;

– вырезка образцов из различных участков по высоте выемного контейнера для определения механических, физических и структурных характеристик чехловой трубы из стали ЭП450;

– определение плотности и распухания материала чехловой трубы методом гидростатического взвешивания, оценка вклада деформации ползучести;

– определение кратковременных механических свойств ( $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_{\text{общ.}}$ ) при испытании образцов при комнатной и рабочей температурах;

– фрактографические исследования изломов образцов после механических испытаний;

– определение элементного состава по толщине образцов чехловой трубы, исследование микроструктуры.

Результаты работы обладают новизной, имеют практическое значение для прочностных расчетов и включены в отчетные материалы АО «ВНИИНМ» по научно-техническому направлению «Прорыв».

Барсанова С.В., Карагерги Р.П., Портных И.А.,  
Пастухов В.И., Кинев Е.А., Ярков В.Ю.

### **Эмпирическая модель щелевой коррозии стали 316L в условиях хранения вторичных отходов ЖРО АЭС «Фукусима» Дайичи**

В литературе отсутствуют данные о теоретическом представлении кинетики развития щелевой коррозии (ЩК) хромоникелевых сталей, в том числе и стали 316L в водных средах, содержащих хлор-ионы. Однако накоплены экспериментальные данные по влиянию хлор-ионов, температуры и длительности испытаний на развитие ЩК конструкционных материалов (КМ). В частности, отмечено, что развитие ЩК КМ, как и питтинговой коррозии, начинается после некоторого, так называемого инкубационного периода времени и далее развивается по зависимостям следующего вида:

при  $T = \text{const}$  и  $[Cl] = \text{const}$

$$D_{cr, \max} = \alpha \cdot (t - t_0)^n, \quad (1)$$

где  $T$  - температура;

$[Cl]$  - содержание хлор ионов в воде

$D_{cr, \max}$  - максимальная глубина ЩК;

$\alpha, n$  - константы;

$t$  - время;

$t_0$  - инкубационный период времени, необходимый для зарождения стабильно растущего питтинга.

при  $T = \text{const}$  и  $t = \text{const} > t_0$

$$D_{cr, \max} = \beta \cdot [Cl]^m, \quad (2)$$

где  $\beta$  - константа.

при  $[Cl] = \text{const}$  и  $t = \text{const} > t_0$

$$D_{cr, \max} = \gamma \cdot \exp(-Q/RT), \quad (3)$$

где  $\gamma$  - константа;

$Q$  - кажущаяся энергия активации процесса;

$R$  - универсальная газовая постоянная.

Из экспериментов также установлено, что инкубационный период времени  $t_0$  зависит от температуры и содержания  $Cl$  в воде и имеет следующую зависимость

$$1/t_0 = C_1 [Cl]^k \cdot \exp(-Q_1/RT). \quad (4)$$

Комбинируя выражения (1)-(3) и, используя выражение (4), после несложных преобразований были получены следующие обобщенные зависимости для максимальной глубины ЩК при переменных значениях  $T$ ,  $t$  и  $[Cl]$ :

$$D_{cr,max} = A_1 \cdot \{t - t_0\}^{n1} \cdot [Cl]^{m1} \cdot \exp(-Q_3/RT), \quad (5)$$

$$D_{cr,max} = A_1 \cdot \{t - [Cl]^{-k1} \cdot \exp(Q_2/RT)\}^{n1} \cdot [Cl]^{m1} \cdot \exp(-Q_3/RT). \quad (6)$$

В период первой половины 2021 г. и второй половины 2022 г. в АО «ИРМ» были проведены коррозионные испытания на стойкость к ЦК стали 316L при 25 и 70 °С в течение ~1000, ~2000, ~3000 и ~4200 часов в насыщенной и разбавленной искусственной морской воде с содержанием хлор-ионов 100, 10 000 и 29 000 ppm в контакте с цеолитом (природным клиноптилолитом), несодержащем и содержащем радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  суммарной мощностью смешанного  $\beta, \gamma$  излучения  $\sim 4,9 \cdot 10^{-2}$  Гр/с. Испытания стали 316L на стойкость к ЦК были проведены в соответствии с рекомендациями стандарта ASTM G78-01 [1] с использованием корончатой втулки, выполненной из радиационно-стойкого фторопласта Ф-40 с 12-ю щелеобразователями для формирования щелевых зазоров между поверхностью стали и неметаллом. С результатами первого этапа коррозионных испытаний длительностью ~1000 и ~2000 ч можно ознакомиться в работе, а с результатами второго этапа длительностью ~3000 и ~4200 ч в настоящем сборнике.

Забегая вперед, следует отметить, что определенные в опытах значения инкубационного периода времени имели достаточно большой разброс, что не позволило определить статистически достоверные значения констант, входящих в выражение (4). Поэтому математическую обработку экспериментальных данных проводили для выражения (5) с использованием литературного выражения для оценки инкубационного периода развития щелевой коррозии, полученного из данных электрохимических исследований

$$CIT \cong k \cdot 10^{\left( \frac{PREN(1 - \Delta E_{c,cr})}{3 \cdot \log[Cl^-]} \right)}, \quad (7)$$

где  $CIT$  - инкубационный период времени до начала развития щелевой коррозии, ч;

$k$  - константа, ч.

$\Delta E_{c,cr}$  - разность потенциалов свободной коррозии  $E_c$  и потенциала начала развития щелевой коррозии  $E_{rup}$ , определяется выражением (в SHE)

$$\Delta E_{c,cr} = E_c - E_{rup}. \quad (8)$$

Потенциал начала развития щелевой коррозии  $E_{rup}$  определяется следующим обобщенным выражением

$$E_{rup} \cong \frac{298}{T+273} \cdot \left( \frac{PREN}{25} - 0.25 \cdot \log \left[ \frac{Cl}{36} + 1 \right] - 0.20 \right). \quad (9)$$

Для оценки устойчивости нержавеющей стали к точечной коррозии в литературе широко используется показатель «PREN» (числовой эквивалент стойкости к точечной коррозии [5]). Показатель PREN зависит от химического состава стали и учитывает количество содержащегося в стали хрома, молибдена и азота. В научной литературе встречаются различные методы расчета данного показателя. Наиболее часто используются следующая формула:

$$PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N \quad (10)$$

для нержавеющей стали с содержанием молибдена менее 3 масс. %.

Для получения выражения потенциала свободной коррозии  $E_c$  стали 316L в водных средах, содержащих хлор ионы, были использованы данные литературных источников, математическая обработка которых позволила получить следующее выражение для потенциала свободной коррозии стали 316L в воде с различным содержанием хлор ионов в условиях без облучения

$$E_c = 925,45 - 3,2 \cdot T + 52,6 \cdot \text{Log}[Cl], \quad (11)$$

где  $E_c$  - потенциал свободной коррозии, мВ (SHE)

$T$  - температура, К;

$[Cl]$  - содержание хлор ионов в воде, ppm.

Обработка данных электрохимических измерений питтинговой коррозии стали 316L дает следующее выражение для разницы базисов питтингостойкости образцов основного металла в воде, содержащей хлор ионы,

$$\Delta E_b - \Delta E_b^* = 972,7 - 157,3 \cdot \text{Log}[Cl] - 0,75 \cdot T, R^2=0,98, n=6, \quad (12)$$

где  $\Delta E_b$  - базис питтингостойкости в условиях вне облучения, мВ;

$\Delta E_b^*$  - базис питтингостойкости в условиях  $\beta, \gamma$ -облучения, мВ;

$[Cl]$  - содержание хлор ионов в воде, ppm;

$T$  - температура, К.

Для более точного прогнозирования протекания коррозионных процессов на поверхности стали 316L внутри колонн KURION и SARRY по наиболее опасному варианту щелевой коррозии произведена математическая обработка экспериментальных данных образцов основного металла стали 316L, полученных в работах в условиях вне и под облучением.

Для условий вне и под облучением получены следующие выражения:

$$D_{cr,max} = (1490 \pm 5) \cdot (t - t_{o,cr})^{(0,29 \pm 0,12)} \cdot [Cl]^{(0,63 \pm 0,09)} \cdot \exp\{-(3860 \pm 240)/T\}, R^2=0,95; n=23; \quad (13)$$

$$D_{cr,max}^* = (9,78 \pm 2,33) \cdot [Cl]^{(0,28 \pm 0,05)} \cdot (t - t_{o,cr})^{(0,44 \pm 0,05)} \cdot \exp\{-(1510 \pm 160)/T\}, R^2=0,92; n=32. \quad (14)$$

Следует отметить, что математическая обработка результатов испытаний проводилась с использованием выражения (5) и представлением его в линейном виде путем логарифмирования для удобства проведения математической обработки.

В соответствии с данными регрессионно-дисперсионного анализа результатов математической обработки расчетные значения критерия Фишера значительно больше критериального, что свидетельствует об адекватности принятой модели описания развития глубины щелевой коррозии в зависимости от выбранных параметров. Высокие значения детерминантности  $R^2$  означают о тесной функциональной взаимосвязи экспериментальных значений глубины ЩК с расчетными, а более высокие расчетные значения  $t$ -критерия Стьюдента по сравнению с критериальными свидетельствуют о статистической значимости определяемых параметров выражений (13) и (14).

Результаты расчетов глубины ЩК по выражениям (13), (14) приведены на рисунке 8 и 9.

Согласно данным в условиях вне облучения не ожидается развития ЩК при 25 °С и содержании хлор-ионов ниже 100 ppm в течение всего 50-летнего срока хранения

вторичных отходов ЖРО АЭС «Фукусима» Дайичи в сорбционных колоннах типа KURION и SARRY, выполненных из стали 316L. При  $[Cl^-]=100$  ppm и повышенной температуре 70 °С развитие ЩК возможно только после 35 лет хранения.

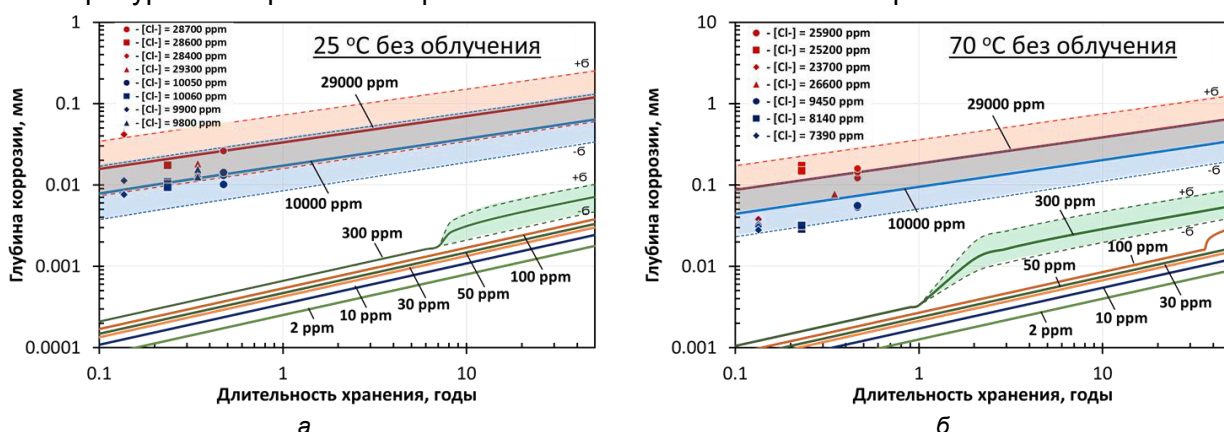


Рисунок 8 - Кинетические зависимости изменения суммарной глубины коррозии (равномерная + ЩК) стали 316L вне облучения для различных условий хранения вторичных отходов ЖРО АЭС «Фукусима-Дайичи»

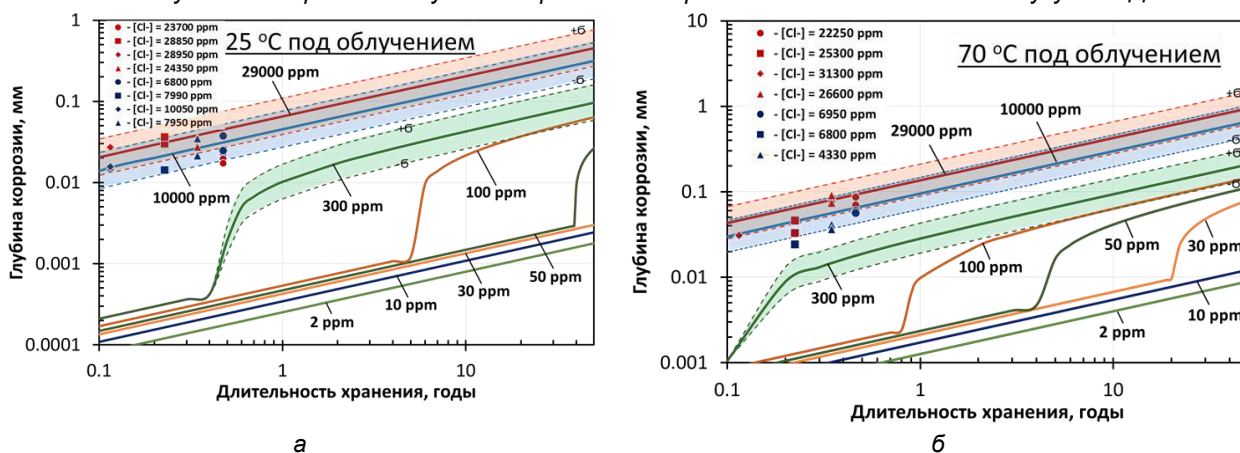


Рисунок 9- Кинетические зависимости изменения суммарной глубины коррозии (равномерная + ЩК) стали 316L под облучением для различных условий хранения вторичных отходов ЖРО АЭС «Фукусима-Дайичи»

В условиях хранения под облучением инкубационный период времени ЩК резко сокращается, приводя к риску ее развития при более низких значениях хлор-ионов и повышенных значениях температуры (рисунок 9). Ускоряющее влияние облучения обусловлено сокращением разницы между базисами стойкости к ЩК в условиях без облучения и при его наличии, принятый в расчетах равным выражению (12).

Однако при содержании хлор-ионов, принятым равным 2-10 ppm для хранения вторичных отходов ЖРО АЭС «Фукусима» Дайичи в сорбционных колоннах типа KURION и SARRY, выполненных из стали 316L, не ожидается развития ЩК стали на протяжении всего 50-летнего периода хранения.

О.А. Голосов, С.С. Хвостов, Н.В. Глушкова,  
Ю.В. Лапин, Ю.И. Пономарева, А.А. Осинцева

### Экспериментальные исследования щелевой коррозии стали AISI 316L в водных растворах, содержащих хлор-ионы

Настоящая статья является продолжением работ первого этапа, начатых в 2021 г., результаты которого были изложены в работе.

Общей целью работ являлось проведение коррозионных испытаний и исследований по определению стойкости стали AISI 316L к щелевой коррозии (ЩК) в водных средах, содержащих хлор-ионы, при параметрах близких к эксплуатации и хранения вторичных отходов радиоактивных ЖРО АЭС «Фукусима-Дайичи» в

сорбционных колоннах KURION и SARRY и контакте стали с частицами цеолита, содержащего радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

Исследовались образцы основного металла аустенитной хромоникелевой стали AISI 316L. Коррозионные испытания проводили в соответствии с рекомендациями стандарта ASTM G-78-01 при 25 и 70 °C в непосредственном контакте образцов стали с частицами цеолита в виде природного клиноптилолита с размерами частиц от 0,7 до 3 мм, содержащего радионуклиды  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  с суммарной мощностью смешанного  $\beta, \gamma$ -излучения  $4,9 \cdot 10^{-2}$  Гр/с. В 2022 г. были достигнута суммарная длительность коррозионных испытаний ~3000, ~4200 ч. Испытания на стойкость стали 316L к ЩК проводили с использованием контактной пары типа «металл-неметалл», внешний вид которой был приведен в работе. В контактной паре в качестве металла служили образцы стали 316L размером 30x30x3 мм, а в качестве неметалла использовался фторопласт Ф-40 в виде корончатой втулки диаметром 20 мм с 12 щелеобразователями.

О стойкости стали к ЩК судили по данным визуального осмотра на предмет отсутствия/наличия очагов локальной коррозии, по определению плотности, размеров и глубины очагов ЩК при их наличии. Глубина и размеры очагов ЩК определяли с использованием конфокального лазерного измерительного микроскопа LEXT OLS5000.

На рисунках 11 и 12 приведены фотографии внешнего вида образцов стали после коррозионных испытаний при 25 и 70 °C в течение 3024 и ~4100 часов в разбавленной и насыщенной искусственной морской воде с различным содержанием хлор-ионов в условиях без облучения и под облучением.

Ни одного очага ЩК не было выявлено при 25 °C в условиях без облучения и под облучением при  $[\text{Cl}^-]=100-150$  ppm (рисунки 10а,б,г), в то время как при повышенном содержании хлор-ионов 450 ppm при облучении было выявлено наличие одного очага ЩК после 3024 ч испытаний (рисунок 10 в). При 70 °C и малом содержании хлор-ионов в воде 100-150 ppm образование очагов ЩК не было выявлено при обеих экспозициях 3024 и 4056 ч в условиях без облучения (рисунки 11 а,б), в то время как под облучением отмечалось наличие следов практически со всеми площадками щелеобразователей (рисунки 11в,г).

Было выявлено, что количество очагов ЩК и максимальная глубина проникновения ЩК в металл возрастает с увеличением времени и температуры испытаний, а также с увеличением содержания хлор-ионов в воде (рисунки 10 и 11).

Используя методику, приведенную в работе, произведена оценка инкубационного периода времени  $t_{o,cr}$ , в течение которого сталь 316L является устойчивой к ЩК. Расчеты  $t_{o,cr}$  выполнены для трех температур 25, 50 и 70 °C на разных стадиях эксплуатации сорбционных колонн KURION/SARRY и представлены на рисунке 12 в диаграмму, характеризующих области устойчивости и склонности стали 316L к щелевой коррозии, на которых также нанесены экспериментальные точки, соответствующие условиям коррозионных испытаний образцов основного металла стали 316L (незакрашенные маркеры соответствуют отсутствию ЩК, а закрашенные маркеры - наличию очагов ЩК).

При построении диаграммы, приведенной на рисунке 12б, оценка инкубационного периода времени  $t_{o,cr}$  производилась с учетом влияние облучения путем введения поправки на изменение базиса питтингостойкости  $\Delta E_{c,cr}$ , полученного авторами работы для стали 316L в диапазоне изменения всех параметров эксплуатации сорбционных колонн KURION и SARRY.

Согласно данным, приведенным на рисунке 12, сталь 316L внутри колонн KURION и SARRY не будет подвержена ЩК в течение всего назначенного 50-летнего периода хранения при условии не превышения выбранного интервала содержания  $\text{Cl}^-$  в воде, равного 2-10 ppm.



Однако при возможных отклонениях содержания хлор-ионов в воде развитие коррозионных процессов на поверхности стали 316L внутри колонн KURION и SARRY по механизму ЩК возможно в условиях без облучения при  $[Cl^-] \sim 200$  ppm при 70 °С после экспозиции  $\sim 100\,000$  часов. При облучении порог по содержанию  $Cl^-$  в воде, необходимый для развития ЩК, согласно рисунку 12б, снижается почти в два раза до  $[Cl^-] \sim 100$  ppm.

Согласно данным, приведенным на рисунке 12, при условии не превышения выбранного интервала содержания  $Cl^-$  в воде, равного 2-10 ppm, сталь 316L в течение всего назначенного 50-летнего периода хранения колонн KURION и SARRY не будет подвержена щелевой коррозии.

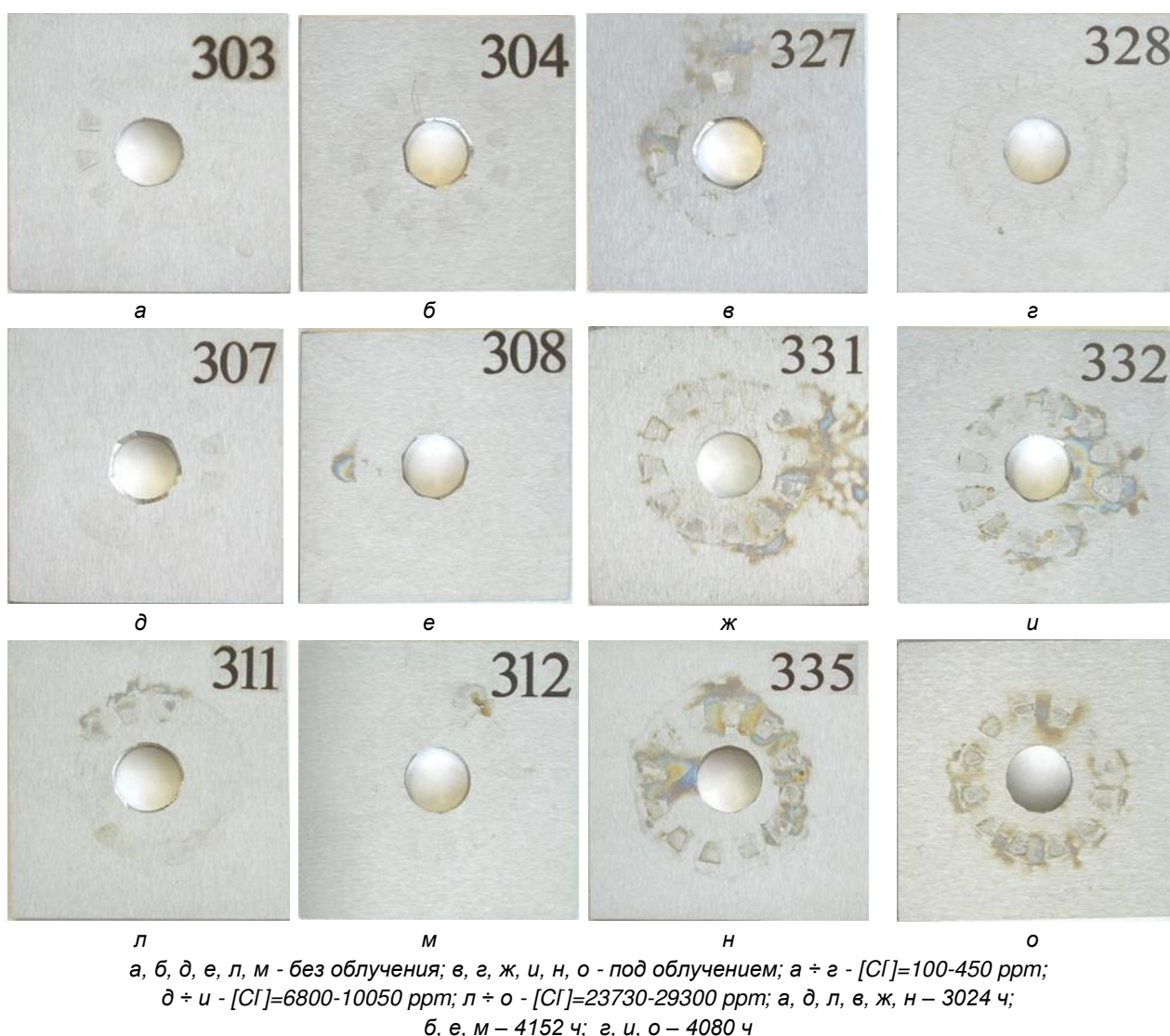
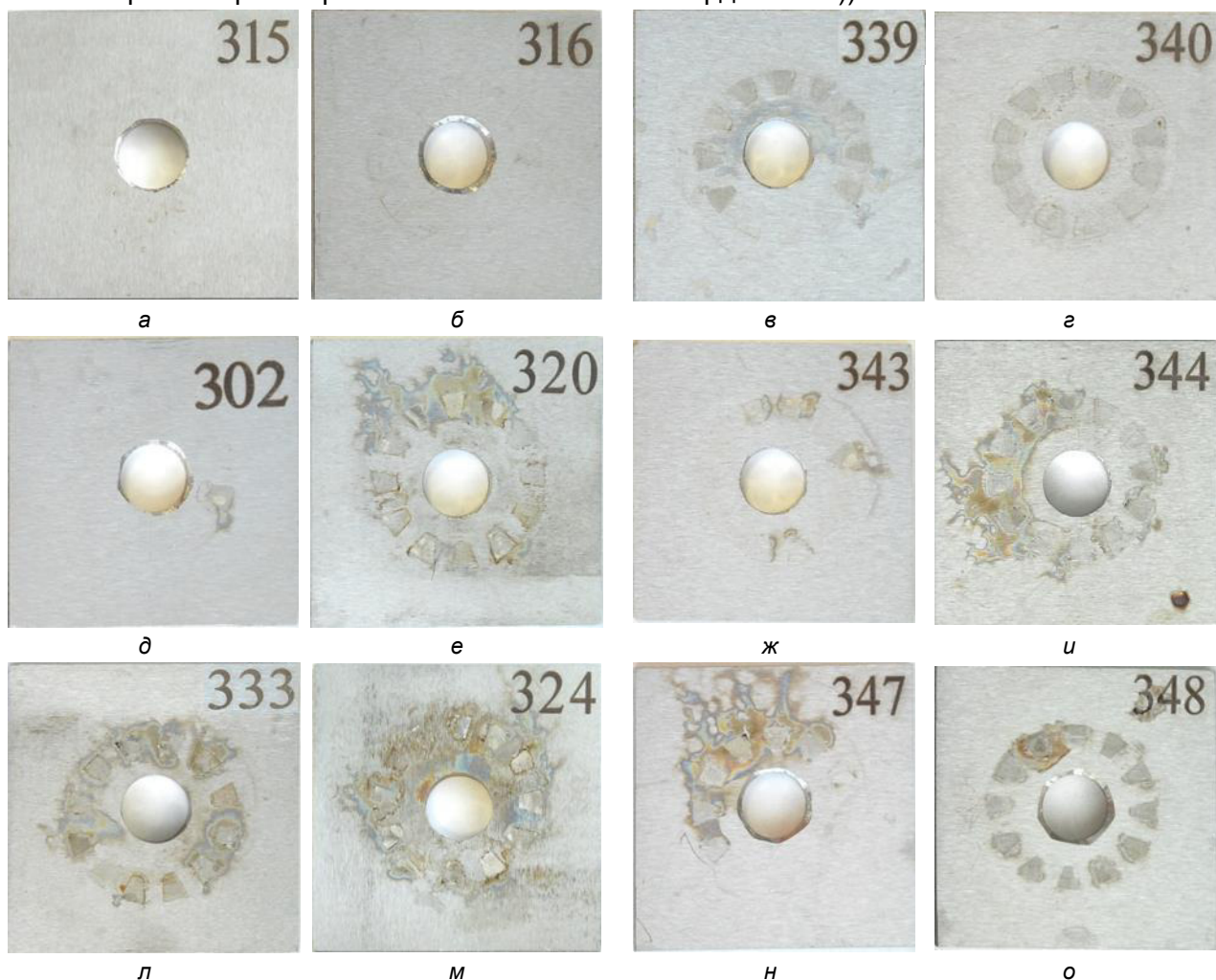


Рисунок 10 - Внешние виды образцов основного металла стали 316L после коррозионных испытаний на склонность к ЩК при 25 °С в течение 3024 и 4080-4152 часов в разбавленной и насыщенной искусственной морской воде с различным содержанием хлор-ионов в условиях без облучения и под облучением

Следует отметить, что при эксплуатации колонн KURION и SARRY в начальный период сорбции радионуклидов из высококонцентрированных ЖПО длительностью от 4 до 7 суток возможно образование очагов ЩК (рисунок 11). При отсутствии облучения для

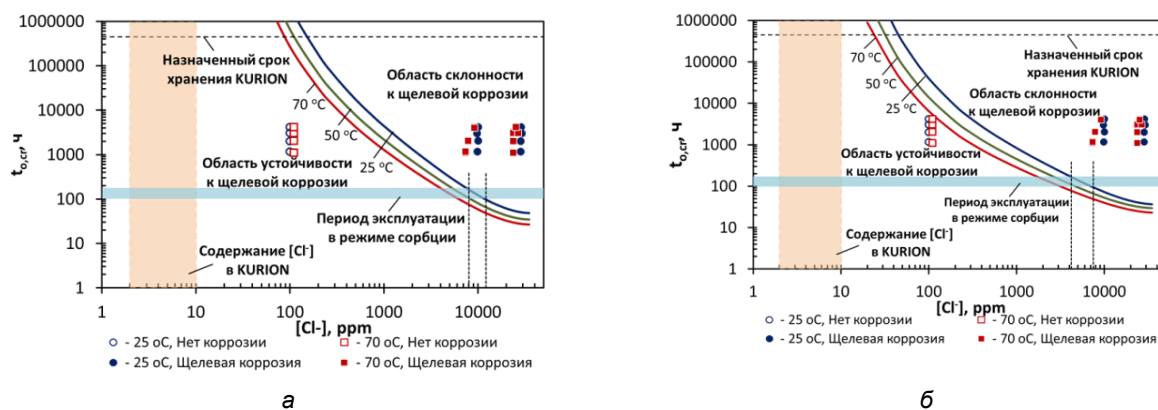
образования очагов ЩК необходимо содержание  $Cl^-$  в воде колонн на уровне от ~12000 до ~19000 ppm (рисунок 12). Под облучением для образования очагов ЩК необходимое содержание  $Cl^-$  в воде колонн снижается до уровня от ~7000 до ~12000 ppm (рисунок 13б).

Исследование выполнено за счет средств субсидии Исследовательского института Mitsubishi Research Institute (Япония) № NSU 52-76 от 18.11.2020 по реализации проекта «Вывод из эксплуатации и обращение с загрязненной водой (НИОКР в области переработки и захоронения твердых РАО (исследования технологии оценки целостности контейнеров во время хранения высокоактивных твердых РАО)).



а, б, д, е, л, м - без облучения; в, г, ж, и, н, о - под облучением; а ÷ г -  $[Cl^-]=90-150$  ppm;  
 д ÷ и -  $[Cl^-]=4330-9150$  ppm; л ÷ о -  $[Cl^-]=22260-31320$  ppm; а, д, л, в, ж, н – 3024 ч; б, е, м, г, и, о – 4056 ч

Рисунок 11 - Внешние виды образцов основного металла стали 316L после коррозионных испытаний на склонность к ЩК при 70 °С в течение 3024 и 4056 часов в разбавленной и насыщенной искусственной морской воде с различным содержанием хлор-ионов в условиях без облучения и под облучением



а - в условиях без облучения; б - в условиях совместного  $\beta, \gamma$ -облучения

Рисунок 12- Диаграммы, характеризующие области устойчивости и склонности стали 316L к щелевой коррозии при различных параметрах эксплуатации сорбционных колонн KURION и SARRY

О.А. Голосов, С.С. Хвостов, Н.В. Глушкова,  
Ю.И. Пономарева, Ю.В. Лапин, А.А.Осинцева

### Структурно-текстурная наследственность в сплаве Zr-2,5% Nb

Цирконий и сплавы на его основе, обладая оптимальным комплексом свойств для эксплуатаций в условиях активной зоны реакторов на тепловых нейтронах, являются основным материалам для конструкционных и функциональных изделий для атомной промышленности.

Проведение широкомасштабных структурных исследований циркония и его сплавов для формирования необходимых физико-механических и коррозионных свойств в 20 веке, позволило разработать технологии для изготовления конструкционных и функциональных деталей реакторов на тепловых нейтронах. Однако, в настоящее время, проблема воздействия облучения на структурное состояние циркониевых сплавов остается актуальной. В частности, особо важными остаются проблемы наводороживания, коррозионных повреждений и радиационного роста сплавов на основе циркония под действием длительного нейтронного облучения. Причиной появления вышеуказанных проблем имеет несколько причин, одна из которых связана со структурно-текстурным состоянием.

Важно отметить, что процесс формирования структуры и текстуры в некоторых материалах сильно связан с исходным состоянием. Понятие структурной наследственности введено Садовским В.Д. Применение новых методов ориентационной микроскопии позволил выявить наличие в сталях и некоторых цветных сплавах структурно-текстурной наследственности, что говорит о взаимосвязи структурного состояния на различных стадиях его изготовления.

Попытки разрешения проблем, вносимых влиянием длительного облучения, привело к новым исследованиям циркония и его сплавов при различных видах деформации и термической обработки более современными методами, позволяющих более качественно изучать изменения структурного состояния. В настоящее время АО «ИРМ» обладает необходимым комплексом современного оборудования для структурных исследований. Понимание принципов формирования структурно-текстурного состояния в сплавах на основе циркония во время  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения позволит в полной мере изучить процессы влияния длительного нейтронного облучения на их свойства.

Изучение особенностей фазовых превращений в сплаве Zr-2,5% Nb при различных скоростях охлаждения (вода и печь) из высокотемпературной  $\beta$ -Zr области показало, что полиморфное превращение с ориентационными соотношениями Бюргерса дает возможность появления 6 вариантов ориентации высокотемпературной  $\beta$ -фазы при  $\alpha \rightarrow \beta$ -

превращении. Дальнейшее охлаждение в  $\alpha$ -область по Бюргерсу предполагает наличие 12 вариантов ориентаций  $\alpha$ -фазы. Таким образом возможно получение вариации из 72 ориентаций  $\alpha$ -фазы после фазовой перекристаллизации, что говорит о невозможности воспроизводства исходной текстуры. Однако полученные результаты ориентационного анализа  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы образцов после термообработок совпадают с исходным образцом и говорят о наличии структурно-текстурной наследственности в сплаве Zr-2,5%Nb, рисунок 13.

Установлено наличие структурно-текстурной наследственности при фазовых  $\alpha(\text{ГПУ}) \rightarrow \beta(\text{ОЦК}) \rightarrow \alpha(\text{ГПУ})$ -превращениях, протекающих в соответствии с ориентационными соотношениями Бюргерса.

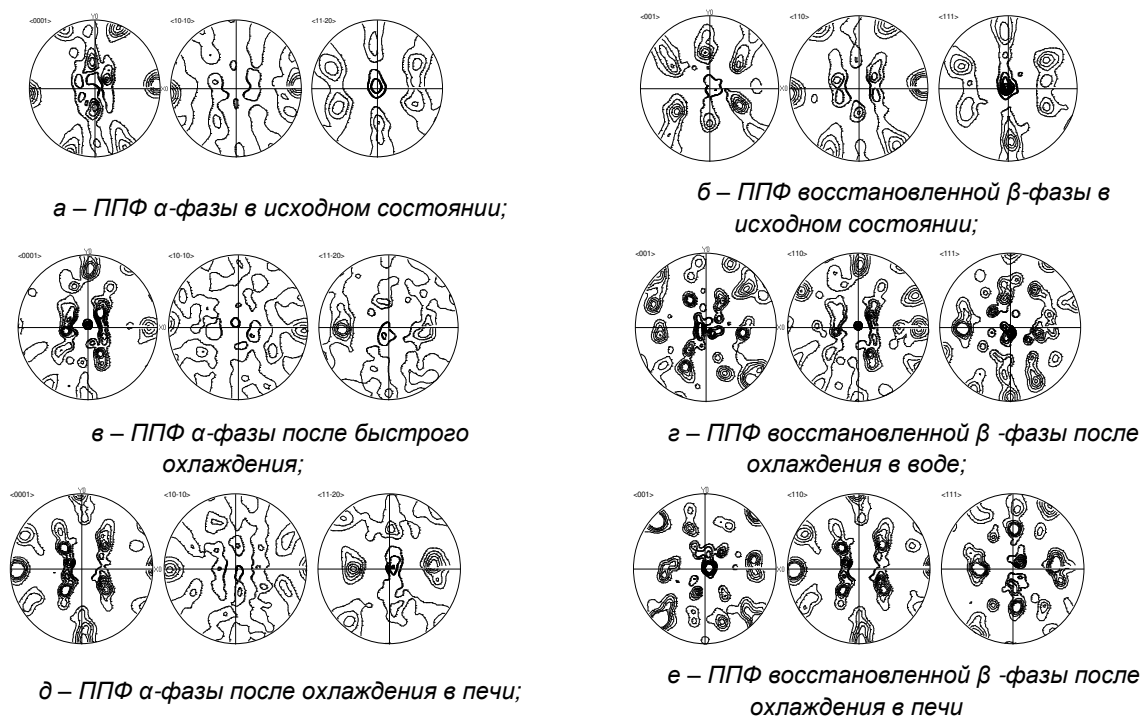


Рисунок 13 – Ориентационный анализ сплава Zr-2,5% Nb после термических обработок

АО «ИРМ»: Ярков В.Ю., Аверин С.А., Цыгвинцев В.А.  
УрФУ им. Б.Н. Ельцина: Лобанов М.Л.

### **Результаты исследования кристаллографических особенностей сдвигового $\gamma$ - $\alpha$ -превращения в метастабильных сталях аустенитного класса после облучения**

Стабильность структурного состояния и свойств в процессе эксплуатации являются одними из главных требований, предъявляемых для материалов атомной промышленности. Одним из самых распространённых классов стали является класс аустенитных сталей типа X18N9 и X18N10T. Аустенитное состояние в данных сталях, с точки зрения «идеального» фазового равновесия, является метастабильным. В нормальных условиях эксплуатации точка мартенситного превращения лежит значительно ниже комнатных температур. Но, в процессе деформации сплавов, релаксация напряжений частично происходит за счет образования  $\alpha$ -фазы – мартенсита. Реализация объемных фазовых переходов в материале изделия неизбежно должно приводить к скачкообразным изменениям его физико-механических и химических свойств.

Методом ориентационной микроскопии (EBSD) исследовано структурное состояние изделий из стали X18N9 и X18N10T после длительного радиационного



облучения при повышенных температурах. В результате радиационного распухания металла в процессе эксплуатации и вследствие изменения геометрических размеров из-за термического расширения при остывании металла до комнатных температур, возникают внутренние напряжения. В процессе подготовки образцов при разделении изделий на части, на поверхности возникают изотропные напряжения, направленные нормально к ней и облегчающие или провоцирующие фазовые превращения в поверхностных слоях.

В поверхностном слое для сталей типа X18H9 и X18H10T под действием внутренних напряжений, обусловленных радиационным распуханием (порядка 3 и 13 % распухания соответственно), реализуется направленное мартенситное превращение, характеризующееся малым количеством кристаллографических ориентаций. Для аустенитной стали X18H9 после продолжительного облучения реализуется частичное фазовое превращение на поверхности, рисунок 14 а. Предложена схема зарождения и показано, что зарождение зерен  $\alpha$ -фазы происходит преимущественно на границах РСУ  $\Sigma 3$  (двойниковых когерентных) между зернами аустенита, что определяет их однозначную кристаллографическую ориентацию, рисунок 14 б.

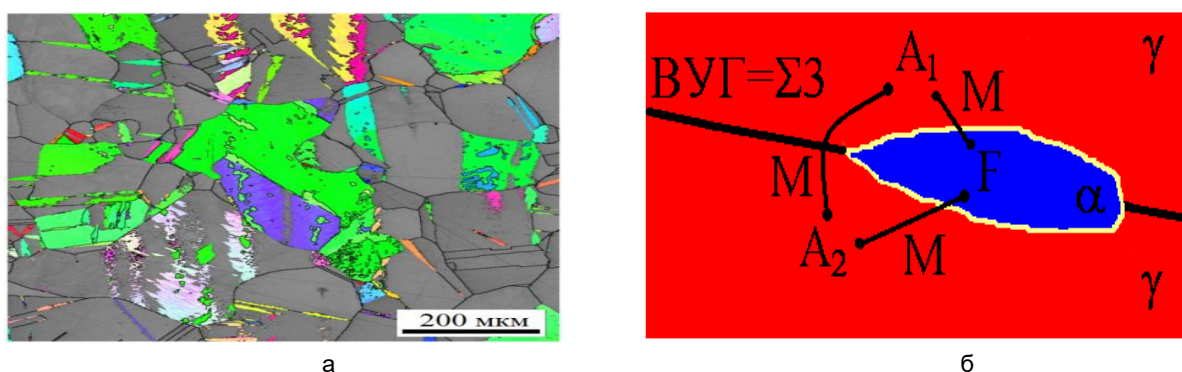


Рисунок 14 – Микроструктура поверхностного слоя образца стали X18H10T в виде ориентационных карт (а – кристаллографические ориентации зерен в  $\alpha'$ -фазе; расцветка с направления Z, нормального к поверхности образца; б – восстановленная структура  $\gamma$ -фазы)

Увеличение внутренних напряжений, связанных с большим распуханием для стали X18H10T, облученной до больших повреждающей дозы, приводят к увеличению доли  $\alpha'$ -фазы на поверхности, рисунок 15.а. По отношению к мартенситу применена методика восстановления родительского зерна по определенным ориентационным соотношениям. Сравнение расположения областей однородной  $\alpha'$ -фазы с «восстановленными» зернами аустенита показало, что каждое отдельное зерно  $\gamma$ -фазы (включая двойники отжига) при полиморфном превращении трансформировалось в один мартенситный пакет, рисунок 15 б.

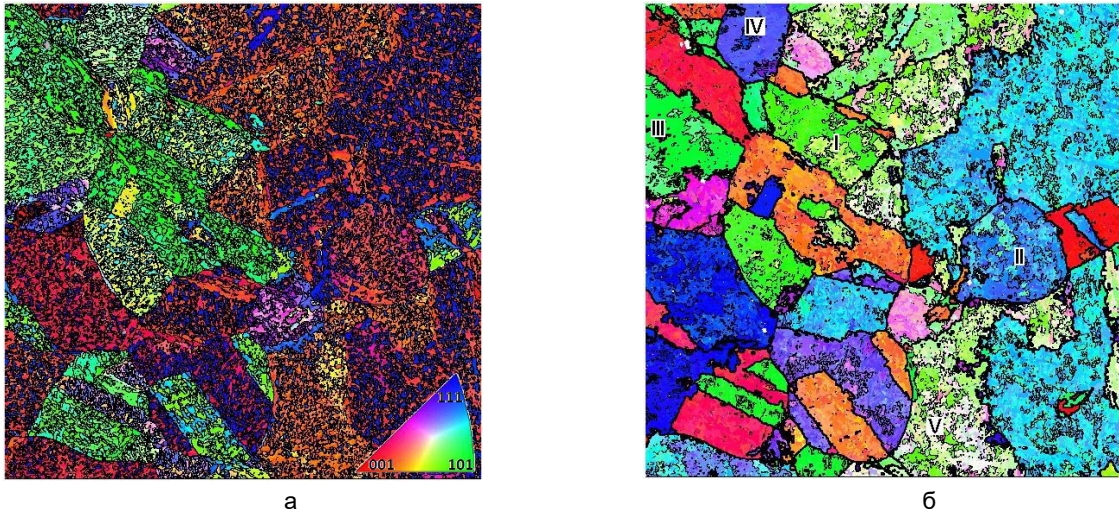


Рисунок 15 – Микроструктура поверхностного слоя образца стали X18N10T в виде ориентационных карт (а – кристаллографические ориентации зерен в  $\alpha'$ -фазе; расцветка с направления Z, нормальному к поверхности образца; б – восстановленная структура  $\gamma$ -фазы)

В результате проведенных исследований установлено, что в аустенитной нержавеющей стали типа X18N9 и X18N10T после длительной эксплуатации изделия при повышенных температурах возрастает склонность к распаду аустенита по сдвиговому механизму, фазовые превращения реализуются по определённым ориентационным соотношениям.

Показана выраженная кристаллографическая направленность распада, инициированная исходными ориентировками зерен аустенита и действием напряжений, направленных нормально к поверхности исследуемых образцов.

Показано, что зарождение зерен  $\alpha$ -фазы происходит преимущественно на границах РСУ  $\Sigma 3$  (двойниковых когерентных) между зёрнами аустенита, что определяет их однозначную кристаллографическую ориентацию.

АО «ИРМ»: Пастухов В.И., Ярков В.Ю., Исинбаев А.Р., Портных И.А.  
УрФУ им. Б.Н. Ельцина: Лобанов М.Л., Редикюльцев А.А.

## РАЗРАБОТКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

### ***Разработка автономных источников питания и накопителей энергии на основе радиоизотопов с бета-распадом нового поколения с повышенными вольт-амперными характеристиками***

Работа выполнена в рамках проекта Единого Отраслевого Тематического плана ГК «Росатом» ЕОТП-ВНЕ-184, в соответствии с договором № 313/2089-Д/61/3452-Д от 16.11.2020 г. по теме: «Разработка автономных источников питания и накопителей энергии на основе радиоизотопов с бета-распадом нового поколения с повышенными вольт-амперными характеристиками».

Необходимость создания малогабаритных автономных источников питания (АИП), имеющих длительный срок службы и относительно высокие показатели удельной мощности, обуславливается ускоренным развитием приборостроения и микроэлектроники. Ключевым недостатком существующих устройств, базирующихся на использовании химической энергии, является необходимость их периодической подзарядки от внешнего источника энергии. Решение проблемы создания малогабаритных источников с длительным ресурсом эксплуатации и не требующим в

течение всего жизненного цикла подключения к внешнему источнику энергии достигается путем применения радиоактивных изотопов. Энергия, сопровождающая их распад, может быть напрямую преобразована в электрическую. Разрабатываемые в настоящей работе малогабаритные радиоизотопные источники питания конденсаторного типа обладают комплексом преимуществ по сравнению с существующими в мире типами изотопных источников энергии. Это, прежде всего, высокий коэффициент полезного действия – коэффициент преобразования энергии радиоизотопного распада в электрическую. Следует, однако, отметить, что активный поиск новых технических решений, обеспечивающих повышение КПД радиоизотопных источников питания, как одного из самых плодотворных методов повышения эффективности использования и снижения стоимости электрической энергии, генерируемой при радиоизотопном распаде, осуществляется не только в разработках АИП конденсаторного типа, но и в бета-вольтаических источниках питания, что значительно повышает привлекательность применения радиоизотопов в различных областях человеческой деятельности. Снижение стоимости АИП достигается за счет использования доступных радиоактивных изотопов. Применение радиоизотопов с более высоким удельным энерговыделением обеспечивает этим источникам питания значительно более высокие характеристики по удельной мощности. Важным преимуществом выполняемой работы является разработка и использование простых, доступных технологий производства источников электропитания.

Проект направлен на создание атомных батарей нового типа, в которых используется бета-излучающий нуклид с высокой энергией излучения -  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  с удельной мощностью 6700 мкВт/Ки.

*Бутаков Д.С., Николкин В.Н., Кузина Т.Л.,  
Келлер Н.В., Тарасов С.В., Золотавин А.А.*

#### **Проведение механических испытаний конструкции автономного радиоизотопного источника питания**

В ходе выполнения проекта Единого Отраслевого Тематического плана Госкорпорации «Росатом» ЕОТП-ВНЕ-184, в соответствии с договором № 313/2089-Д/61/3452-Д от 16.11.2020 г. по теме: «Разработка автономных источников питания и накопителей энергии на основе радиоизотопов с бета-распадом нового поколения с повышенными вольт-амперными характеристиками», совместно с Акционерным обществом «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнёва» были проведены механические испытания технологических образцов АИП (ТО АИП), (рисунок 16).



*Рисунок 16 - Фото ТО МИ*

Технологические образцы, в соответствии с техническим заданием, являются абсолютным аналогом экспериментального образца, но не содержат радиоактивного изотопа.

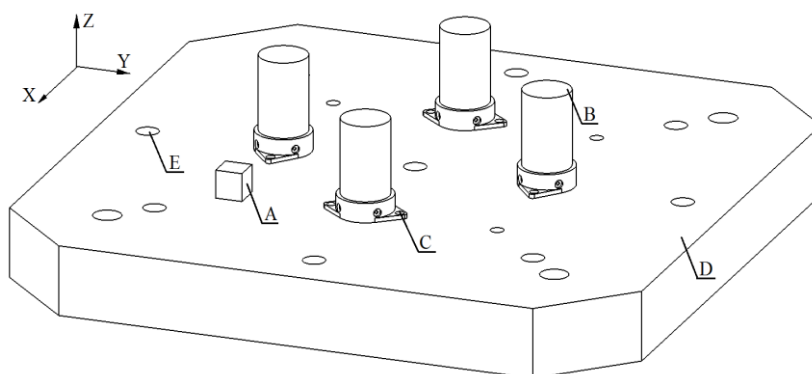
Корпус (ТО АИП) состоит из основания с электрическими выводами и крышки. Под крышкой находятся 7 энергетических ячеек (без радиоактивного изотопа) соединенных между собой и подключенных к электрическим выводам основания, ( рисунок 17).



Рисунок 17 - Рентгенограмма образца ТО АИП №1

Целью испытаний является проверка ТО АИП на стойкость к воздействию динамических механических нагрузок, которым во время эксплуатации подвергаются ЭРИ, установленные в бортовой аппаратуре космических аппаратов, а также подтверждение сохранения работоспособности разработанного экспериментального образца радиоизотопного источника питания при условиях эксплуатации в составе бортового оборудования космических аппаратов.

Испытания проводились одновременно на четырех образцах последовательно по каждой из трех взаимно перпендикулярных осей (рисунок 18). За одну установку проводились последовательно испытания по обнаружению резонансов конструкции до вибрации, испытания на воздействие гармонических и случайных вибрационных нагрузок, а также испытания по обнаружению резонансов конструкции после вибрации.



А – задающий акселерометр (устанавливается на технологическом приспособлении); В – плоскость установки контрольного акселерометра; С – места крепления (2 точки) ТО АИП к технологической оснастке; D – технологическая оснастка; E – места крепления технологической оснастки к стенду.

Рисунок 18– Внешний вид ТО АИП на технологической оснастке для механических испытаний

Обнаружение резонансов конструкции проводились на следующих режимах:

- частота от 5 до 2000 Гц;
- ускорение не более  $4,9 \text{ м/с}^2$  (0,5 g);



– скорость сканирования частоты не более 2 окт/мин.

Испытания на прочность при транспортировании в составе изделия проводились на режимах:

- ускорение не более  $49 \text{ м/с}^2$  (5 g);
- длительность ударного импульса от 2 до 10мс;
- общее количество ударов по трем направлениям – 110000;
- число ударов в минуту от 80 до 120.

Испытания на прочность при транспортировании в упаковке проводились на режимах указанных в таблице 3.

Таблица 3 – Режимы испытаний ТО АИП при транспортировании в упаковке

Направление возбуждения	Ускорение, $\text{м/с}^2$ (g)	Длительность ударного импульса, мс	Количество ударов	Число ударов в минуту
Z-Z	147 (15)	5 – 10	2000	80 – 120
	98 (10)		8800	
Y-Y	118 (12)	2 – 15	200	80 – 120
X-X			200	

Испытания на воздействие ударных нагрузок проводились на режимах, указанных в таблице 4.

Таблица 4 – Ударные нагрузки

Ускорение, $\text{м/с}^2$ (g)	Длительность импульса, мс	Количество ударов по каждому направлению оси
$\pm 17000$ ( $\pm 1750$ )	0,2 – 0,3	3

В результате проведенных экспериментов установлено, что конструкция всех образцов выдержала механические испытания на соответствие требованиям, предъявляемыми к элементам, находящимся в бортовой аппаратуре космического аппарата. Функционирование энергетических ячеек не нарушилось, изменений параметров после механических воздействий не выявлено.

Результаты испытаний подтверждают правильность выбранных материалов и технических решений в части стойкости к механическим воздействиям возникающих на КА и возможность использования материалов, технических решений и технологических процессов в ОКР по созданию промышленных образцов автономных источников питания (АИП).

АО «ИРМ»: Бутаков Д.С., Николкин В.Н., Кузина Т.Л.,  
Келлер Н.В., Тарасов С.В., Золотавин А.А.

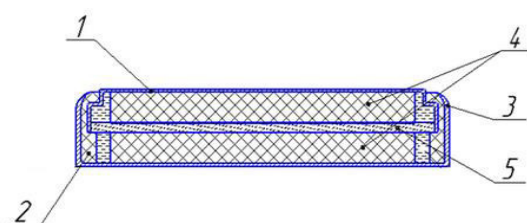
АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева»: В.В. Полещук, А.Г. Рябов,  
Д.В. Ивленьков, А.А. Дружинин, О.А. Климкин, Д.С. Казайкин, К.А. Лапаев

### **Проведение ускоренных радиационных испытаний экспериментальных образцов автономных источников питания с жидким электролитом**

В ходе выполнения проекта Единого Отраслевого Тематического плана ГК «Росатом» ЕОТП-ВНЕ-184, в соответствии с договором № 313/2089-Д/61/3452-Д от 16.11.2020 г. по теме: «Разработка автономных источников питания и накопителей

энергии на основе радиоизотопов с бета-распадом нового поколения с повышенными вольт-амперными характеристиками», совместно с Акционерным обществом «Научно-исследовательским институтом приборов» были проведены ускоренные радиационные испытания экспериментальных образцов автономных источников питания (АИП).

Конструктивно образцы состоят из герметичного защитного корпуса, первого и второго электродов, электрически изолированных друг от друга и выполненных из титановых листов марки ВТ1-0. Один из электродов изолирован от корпуса. Электроды помещены в электролит на основе ионной жидкости и разделены пористой мембраной (сепаратором). В качестве электролита в АИП используется 0,2 мл 1-бутил-3-метилимидазолия трифторметансульфоната в пропиленкарбонате, разбавленного 3:1. Общий вид единичного элемента АИП представлен на рисунке 19.



(1 – катод, 2 – изолирующее фторопластовое кольцо, 3 – противоэлектрод (анод), 4 – углеродный электрод с радионуклидным материалом на катоде и без на аноде, 5 – сепаратор)

Рисунок 19 – Общий вид единичного элемента АИП

На испытания было предоставлено 3 полноценных экспериментальных образца, выполненных в виде набора единичных элементов АИП, размещенных в корпусе цилиндрической формы с крышкой, в которую вмонтированы проволочные контакты. Корпус имеет следующие габаритные размеры: 21 x 31 x 40 мм. Общий вид размещенных в корпусе образцов представлен на рисунке 20.

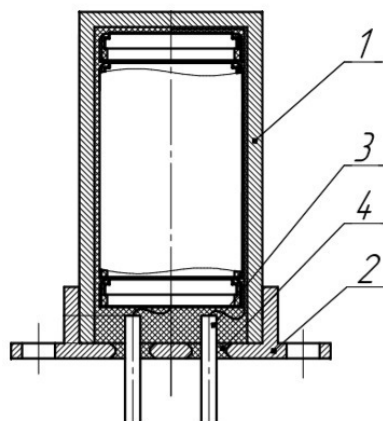


Рисунок 20 – Общий вид размещенных в корпусе ЭОАИП  
(1 – крышка корпуса, 2 – основание корпуса, 3 – электрод, 4 – стекло)

Целью испытаний являлось определение характера изменения информативных параметров (выходных характеристик) ЭОАИП в зависимости от дозы ИИ.

В ходе испытаний ЭОАИП были подвержены радиационному облучению в несколько этапов воздействия от 10 до 100 крад в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5– Последовательность проведения и нормы испытаний

Этап воздействия	Требуемый уровень воздействия	Норма испытаний
1	10 крад	13,5 крад
2	20 крад	27 крад
3	30 крад	40,5 крад
4	100 крад (0,1 Мрад)	135 крад

Примечание: нормы испытаний приведены с учетом коэффициента 0,88 для пересчета единиц поглощенной дозы в единицы экспозиционной дозы (для Si), коэффициента эффективности установки - 0,99 и погрешности дозиметрии – 15 %

Зависимость напряжения холостого хода  $U_0$  исследуемых образцов АИП с паспортными номерами 11-10-22, 11-12-22 и 11-15-22 от уровня дозы ионизирующего гамма-излучения представлена на рисунке 21.

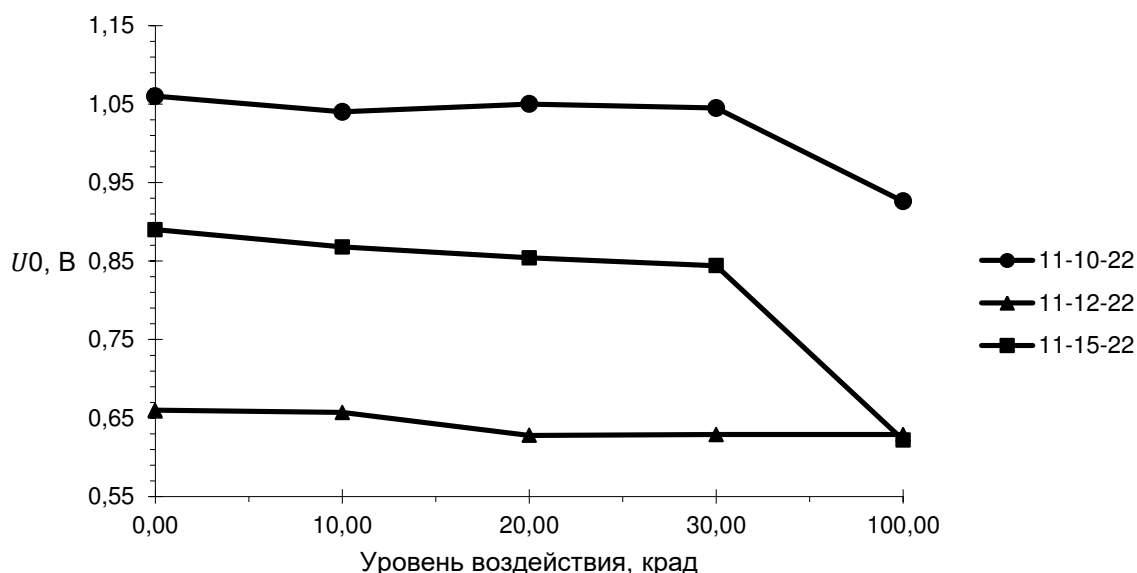


Рисунок 21 – Зависимость напряжения холостого хода  $U_0$  исследуемых образцов АИП с паспортными номерами 11-10-22, 11-12-22 и 11-15-22 от уровня дозы ионизирующего гамма-излучения

Из рисунка 21 видно, что значения напряжения холостого хода для образцов АИП с паспортными номерами 11-10-22, 11-12-22 и 11-15-22 практически не изменяются при поглощенной дозе гамма-излучения до 30 крад и варьируются в пределах 30 мВ. При дальнейшем воздействии ИИ наблюдается ухудшение показателей напряжения холостого хода. При поглощенной дозе порядка 100 крад значения отличаются от исходных примерно на 25 %.

Таким образом, экспериментально установлено, разработанные АИП являются радиационно стойкими до поглощённой дозы в 100 крад, дальнейший набор дозы приводит к значительной деградации выходных характеристик ЭО АИП.

АО «ИРМ»: Бутаков Д.С., Николкин В.Н., Л.П. Синельников  
 АО «НИИП»: А.В. Сиделев, А.С. Петров, М.В. Баньковский, Е.П. Матюхина, Н.С. Хрущев

**Разработка углеродных матриц на основе резорцино-формальдегидной смолы, допированной изотопом  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , для использования в качестве электродов радиоизотопных источников питания**

Электроды АИП типа суперконденсатора, должны обладать определенными параметрами удельной площади поверхности, пористости и электропроводности, так как накопление и удержание заряда в АИП суперконденсаторного типа происходит в двойном электрическом слое (ДЭС), возникающем на границе раздела фаз электрод/электролит. Поскольку в качестве радиоизотопа, генерирующего заряд АИП, был выбран изотоп  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , изготовление электрода, содержащего его в форме металла, невозможно из-за высокой реакционной способности щелочноземельного элемента. Использование в качестве электродного материала солей или других соединений стронция не обеспечит необходимую электропроводность электрода. Многообразие аллотропных модификаций и морфологических типов делают углерод весьма перспективным для электрохимических областей применения: углеродные электроды хорошо поляризуются, являются химически инертными, устойчивы в широком диапазоне температур; амфотерность углерода позволяет использовать его как в качестве катода, так и анода. Кроме того, углеродные материалы при соответствующей обработке обладают высокой площадью поверхности и регулируемой пористостью, необходимой для создания развитого ДЭС.

Изготовление углеродного материала с развитой поверхностью, допированного радиоизотопами, накладывает определенные трудности в технологию синтеза. Углеродный материал (или его прекурсор) должен прочно удерживать внесенный изотоп в своей структуре.

Наиболее часто применимые методы, такие как методы жесткого шаблона и химической активации, показывающие высокие физико-химические характеристики, не могут быть применены из-за стадии выщелачивания неорганических веществ (порообразователей) в растворах кислот с использованием ультразвука и повышенной температуры. Это связано с высокой растворимостью соединений стронция в водных растворах кислот и потере радиоактивного вещества. Кроме того, данные методы отличаются высокой трудоемкостью, что при использовании радионуклидов будет приводить к дополнительным дозовым нагрузкам на персонал.

Метод гидротермальной обработки также накладывает ограничения к применению из-за обработки углеродного прекурсора в маточном растворе при высоких температурах (до 300 °С) из-за вероятного выхода радиоизотопа  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  из углеродной матрицы в раствор.

Метод мягкого шаблона технологически возможен для изготовления углеродной матрицы, допированной радионуклидами, однако высокая стоимость и малодоступность используемых в роли мягких шаблонов веществ затрудняют его использование.

Метод синтеза полимерных наносфер показывает низкие значения параметров удельной площади поверхности и удельной электрической емкости без дополнительной обработки.

Оптимальным и легко применимым способом синтеза углеродного материала, допированного радионуклидами, оказывается метод физической активации. Метод не содержит в себе этапов, которые способствовали бы выходу радиоизотопа из состава углеродного материала. Метод отличается относительной простотой и низкими трудозатратами. Короткое время обработки полимерного прекурсора позволит уменьшить дозовую нагрузку на персонал при работе с радиоактивным материалом (по сравнению с другими методами). Невысокая стоимость и доступность активирующего газа ( $\text{CO}_2$ ) также является преимуществом данного способа синтеза.

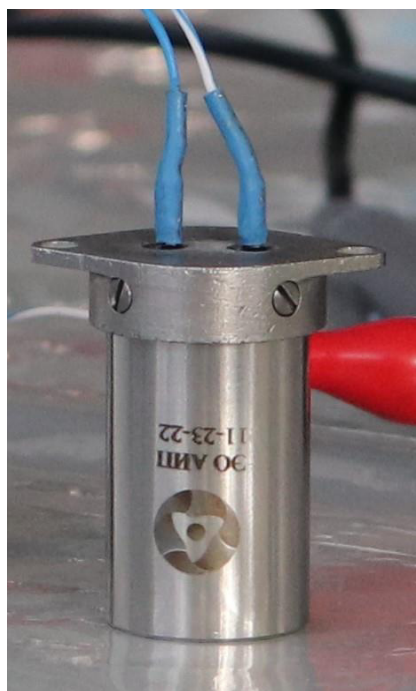
На основании рассмотренной литературы, и по результатам проведенных исследований более перспективной методикой синтеза углеродной матрицы, содержащей изотоп  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , для применения в радиоизотопных источниках питания конденсаторного типа является предварительная карбонизация РФС с последующей физической активацией в атмосфере  $\text{CO}_2$ .

Углеродные матрицы, полученные методом физической активации имеют увеличенную более чем в 10 раз удельную электрическую емкость. Достигнутое изменение связано с увеличением размера пор материала, развитием удельной поверхности углеродной матрицы и повышением доступности поверхности ионам электролита.

*Бутаков Д.С., Николкин В.Н., Плюхина В.Я., Аскарлова А.А.,  
Десятарева Е.В., Кузина Т.Л., Келлер Н.В., Тарасов С.В., Золотавин А.А., Зарубина О.К.*

### **Проведение энергетических испытаний экспериментальных образцов автономных источников питания с жидким электролитом**

В ходе выполнения проекта Единого Отраслевого Тематического плана ГК «Росатом» ЕОТП-ВНЕ-184, в соответствии с договором № 313/2089-Д/61/3452-Д от 16.11.2020 г. по теме: «Разработка автономных источников питания и накопителей энергии на основе радиоизотопов с бета-распадом нового поколения с повышенными вольт-амперными характеристиками», были проведены энергетические испытания экспериментальных образцов автономных источников питания (АИП), внешний вид образца представлен на рисунке 22.



*Рисунок 22–Экспериментальный образец для испытаний*

Экспериментальный образец изготовлен с использованием радиоактивного изотоп  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , суммарная активность радиоизотопа в источнике составляла 28 мКи.

Испытания проводились для подтверждения соответствия эксплуатационных показателей АИП, заявленным в техническом задании, а также выбора и обоснования оптимальных технических решений, направленных на улучшение энергетических характеристик опытного образца автономного источника питания с жидким электролитом.

Перечень операций, которые были выполнены при испытаниях АИП для достижения поставленной цели:

–регистрация падения напряжения на ЭОАИП с подключенным нагрузочным резистором;

–регистрация падения напряжения на ЭОАИП под воздействием климатических факторов (пребывание в предельных значениях диапазона рабочих температур).

АИП был установлен в испытательный стенд на основе измерительных модулей ADAM 4017 для непрерывной регистрации динамики напряжения при подключении постоянной нагрузки. К АИП был подключен нагрузочный резистор номиналом в 99,9 кОм. На рисунке 23 представлен график изменения напряжения на ЭО АИП в течение всего времени испытаний.

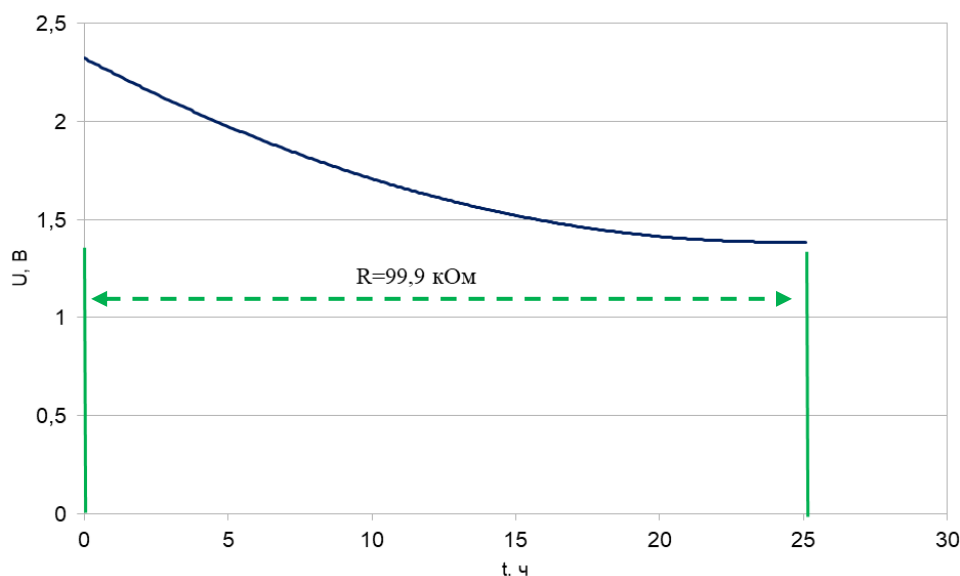


Рисунок 23 – Динамика напряжение на ЭО АИП при подключении постоянной нагрузки

В таблице 6 представлены энергетические характеристики АИП 11-23-22 в процессе испытаний с нагрузочным резистором.

Таблица 6 – Энергетические характеристики АИП 11-23-22

Номинальное значение резистора, кОм	Напряжение с нагрузочным резистором $U_p$ , В	Электрический ток с нагрузочным резистором $I_p$ , мкА	Электрическая мощность с нагрузочным резистором $W_p$ , мкВт
99,9	1,38	13,8	19,0

Мощность источника излучения в АИП можно рассчитать по формуле:

$$P_{III} = e \cdot E_{pp} \cdot A_{II} \quad (1)$$

где  $e$  - заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,

$E_{pp}$  – средняя энергия единичного радиоактивного распада изотопа в эВ,

$A_{III}$  – активность изотопа в образце, Бк.

Согласно расчетным данным мощность источника излучения, загруженного в АИП 11-23-22 составляет 245,3 мкВт.

Эффективность преобразования энергии радиационного распада в электрическую энергию была рассчитана по формуле (2) и составляет 7,7 %.

$$\eta = \frac{W_P}{W_T} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $W_P$  - электрическая мощность с нагрузочным резистором,

$W_T$  - мощность источника излучения в ЭО АИП.

На следующем этапе испытаний АИП был установлен в климатическую камеру для проведения испытаний в диапазоне температур от -65 до +130 °С, на рисунке 24 представлена кривая изменения напряжения на АИП в зависимости от температуры

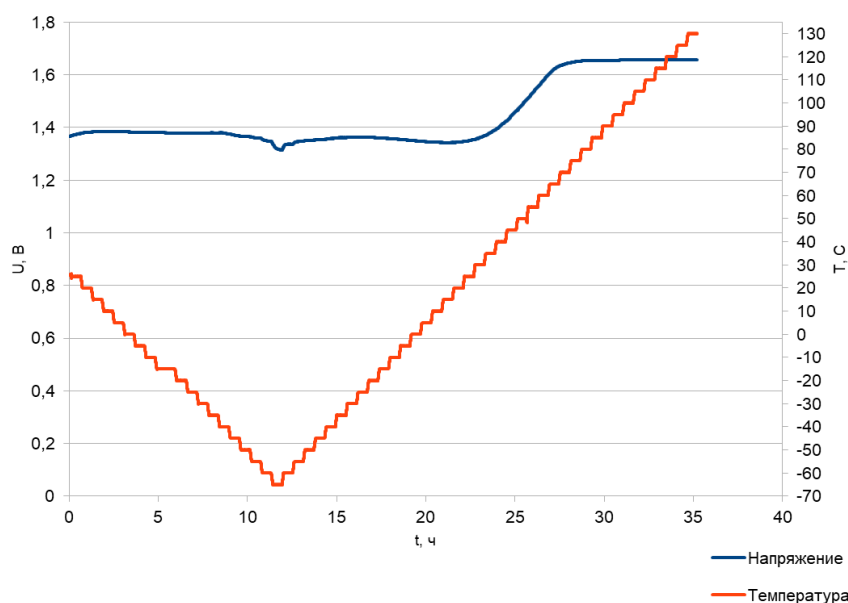


Рисунок 24 – Динамика напряжение на АИП при воздействии температуры

Таким образом, по результатам проведённых энергетических испытаний, экспериментально получено следующее:

–разработанная технология изготовления АИП позволяет преобразовывать энергию радиационного распада в электрическую энергию с эффективностью 7,7 %;

–достигнуты следующие энергетические характеристики АИП при постоянной нагрузке:

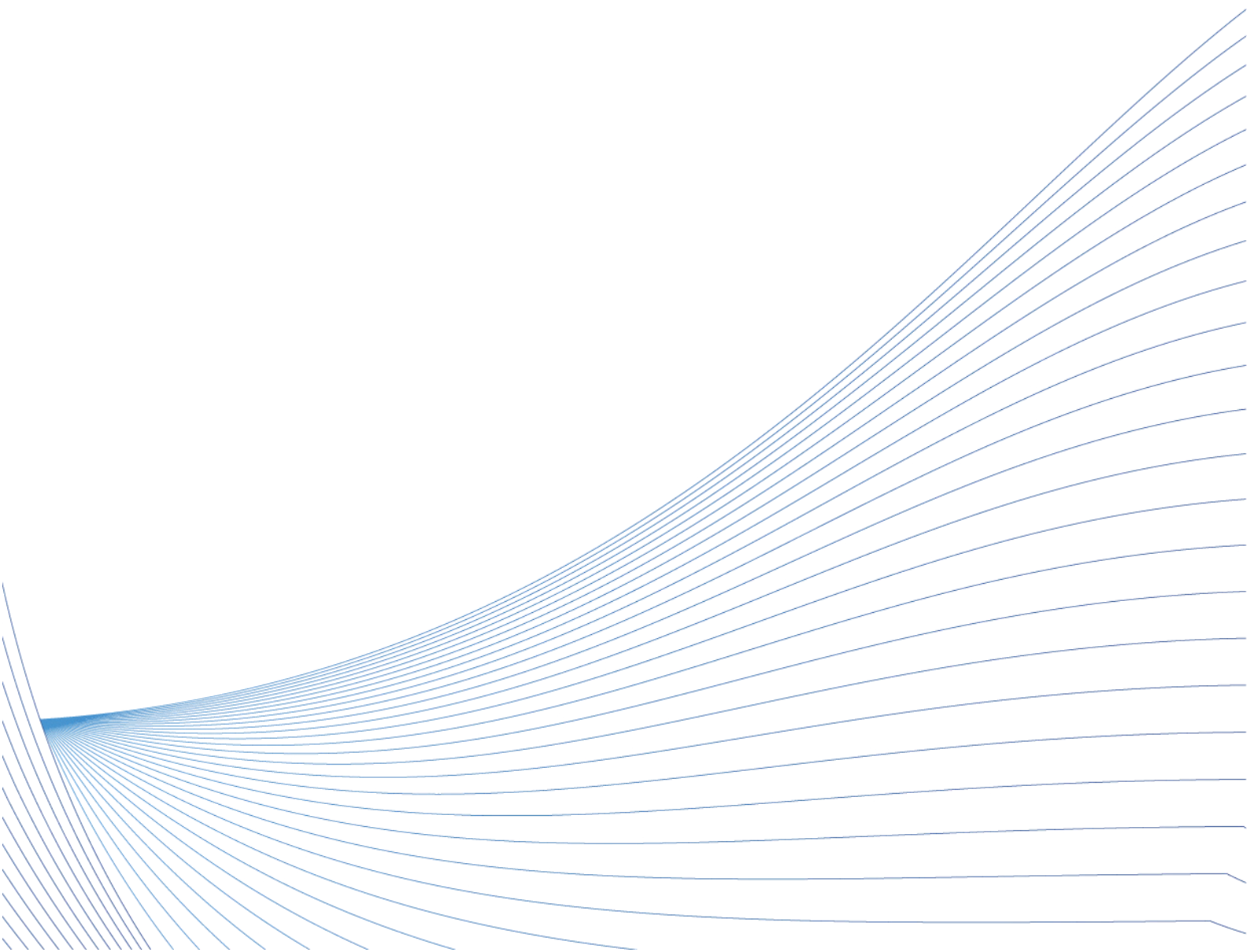
- а) выходное напряжение:  $U_H=1,38$  В;
- б) ток нагрузки:  $I_H=13,8$  мкА;
- в) суммарный габаритный объём единичных элементов:  $3,2$  см<sup>3</sup>;
- г) диапазон рабочих температур: -65 до +130 °С

Бутаков Д.С., Николкин В.Н., Л.П. Синельников,  
Н.В. Келлер, С.В. Тарасов, А.А. Золотаев





# ДОСТИЖЕНИЯ



**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПО НАУКЕ**

**Наукометрические показатели за 2022 год**

№	Показатель	Количество
1.	Созданные РИД, шт.	6
2.	Использованные РИД, шт.	21
3.	Научные публикаций, шт.	61
	Из них: индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования, шт	37
4.	Обучающиеся сотрудники (аспирантура/соискатели/магистратур)	20
5.	Стажёры/практиканты	17

**Внедрение вновь созданных результатов научно-технической деятельности (РНТД)**

1 Освоена усовершенствованная методика расчета результатов испытаний тонкостенных трубчатых образцов. Новая методика обработки результатов экспериментов применена при проведении комплексных послереакторных разрушающих исследований твэлов ТВС реактора БН-600. Использование новой методики расчетов позволило повысить точность и надежность результатов механических испытаний тонкостенных оболочек твэлов,

2 Техническое устройство для овализации кольцевого образца, вырезанного из оболочки твэла реакторов на быстрых нейтронах. Традиционная методика механических испытаний на растяжение не учитывала деформацию образца оболочки на начальном этапе растяжения, когда происходила овализация кольца. Использование данного устройства в ходе проведения механических испытаний оболочки твэла в 2022 году позволило получить более точные характеристики прочности и пластичности материала в соответствии с установленными требованиями технического задания Заказчика по теме.

*Перечень публикаций*

	Характер документа	Название	Авторы	Источник публикации
1	статья	Определение коэффициента заторможенности деформации для вычисления начальной расчетной длины рабочей части кольцевого образца из оболочки твэла.	Карагерги Р.П., Евсеев М.В., Козлов А.В.	Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022;88(4):33-41. <a href="https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-4-33-41">https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-4-33-41</a>

2	статья переводная	Determination of the deformation deceleration coefficient for calculating the initial effective length of the working part of an annular specimen made of fuel cladding	Karagergi, R.P., Evseev, M.V., Kozlov, A.V.	ZavodskayaLaboratroya. DiagnostikaMaterialov, 2022, <a href="https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-4-33-41">https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-4-33-41</a>
3	доклад	The working capacity analysis of boron carbide after two-year operation as an emergency protection material of the fast reactor	Kinev E.A., Evseev M.V., Tsygvintsev V.A., Pastuhov V.I.	Proceedings International-Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR22: Sustainable Clean Energy for the Future (CN-291), 19-22 April, Vienna, Austria. Paper A-124
4	доклад	Non-destructive method determining steel corrosion coefficients in lead	GolosovO.A., Glushkova N.V., Kuzina T.L., Kozlova A.A., Tsygvintsev V.A.	Proceedings International-Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR22: Sustainable Clean Energy for the Future (CN-291), 19-22 April, Vienna, Austria. Paper A-124
5	статья	Развитие радиационной пористости в материале оболочек различной технологии изготовления твэлов реакторов на быстрых нейтронах и ее влияние на ресурс эксплуатации ТВС в реакторе БН-600	Исинбаев А.Р., Портных И.А., Козлов А.В.	Физика металлов и металловедение. 2022. Том: 123, № 5. С. - 562-568
6	статья переводная	Development of radiation porosity in the material of fuel-element cladding produced by different technologies for fast neutron reactors and its influence on the fuel assembly service life in the BN-600 reactor	Isinbaev A.R., Portnykh I.A., Kozlov A.V.	Physics of Metals and Metallography. 2022. Том: 123, № 5. С. - 528-534 <a href="https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X22050052">https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X22050052</a>

7	статья	Разработка тестовых задач активной зоны исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М для нейтронно-физических расчётов	Метелева Ю.В., Зырянова А.А.	<a href="http://www.atominfo.ru/newsz05/a0237.htm">http://www.atominfo.ru/newsz05/a0237.htm</a>
8	статья	Microstructural and mechanical properties of pressureless sintered high-resistant SiC composite materials	Shishkin R.A., Yuferov Y.V., Karagergi R.P., Schak A.V.	Journal of Korean Ceramic Society. 2022. <a href="https://doi.org/10.1007/s43207-022-00242-9">https://doi.org/10.1007/s43207-022-00242-9</a>
9	тезисы докладов	Итоги работы исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М за 2021 год	Новгородский В.С., Роговский А.М., Бутаков А.В.	Безопасность исследовательских ядерных установок. Тезисы докладов XXII Российской конференции. Димитровград, 2022. Стр. 7-8.
10	тезисы докладов	Обеспечение безопасности при хранении отработавших тепловыделяющих сборок в шахте-хранилище исследовательской ядерной установки ИВВ-2М с использованием системы пассивного расхолаживания	Шумков Д.Е., Новгородский В.С.	Безопасность исследовательских ядерных установок. Тезисы докладов XXII Российской конференции. Димитровград, 2022. Стр. 62-63.
11	статья	Кристаллографические особенности фазовых превращений в стали 100ХН3А	Зорина М. А., Ярков В. Ю., Редикульцева А. А.	Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 7 (805). С. 28-33
12	статья переводная	Crystallographic Features of Phase Transformations in Steel 100KhN3A	Zorina, M.A., Yarkov, V.Y., Redikul'tsev, A.A.	Metal Science and Heat Treatment. Volume 64, pages 379–383 (2022)
13	статья	Структурно-текстурная наследственность в сплаве ZR - 2,5 % NB	Ярков В. Ю., Пастухов В. И., Аверин С. А., Ладейщиков К. М., Цупрун Ю. И.	Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 7 (805). С. 47-52

14	статья переводная	Inheritance of Structure and Texture in Alloy Zr – 2.5% Nb	Yarkov V. Yu., Pastukhov V. I., Averin S. A., Ladeishchikov K. M., Tsuprun Yu. I.	Metal Science and Heat Treatment. Volume 64, pages 397–402 (2022)
15	статья	Кристаллографические особенности сдвигового $\gamma$ — $\alpha$ -превращения в стали 10X18N10T, подвергнутой радиационному облучению	Лобанов М. Л., Пастухов В. И., Редикульцев А. А., Исинбаев А. Р., Зорина М. А.	Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 8 (806). С. 9-14
16	статья переводная	Crystallographic Features of Shear $\gamma$ – $\alpha$ Transformation in Steel 10Kh18N10T Subjected to Radioactive Irradiation	Lobanov, M.L., Pastukhov, V.I., Redikultsev, A.A., Isinbaev, A.R., Zorina, M.A.	Metal Science and Heat Treatment. Volume 64, pages 430–435 (2022)
17	тезисы докладов	Матрицы для иммобилизации отходов пирохимической переработки облученных циркониевых сплавов	Матвеев А.В., Нечаев П.С., Михеев И.В., Петров В.Г.	РАДИОХИМИЯ-2022, X Российская конференция с международным участием. Москва, 2022. Издательство: ООО "Месол", С. 436
18	тезисы докладов	Подходы к обращению с циркониевыми металлическими РАО на примере облученных топливных каналов реакторов РБМК	Нечаев П.И., Хвостов С.С., Лапин Ю. В., Половов И. Б., Сандалов И.П.	РАДИОХИМИЯ-2022, X Российская конференция с международным участием. Москва, 2022. Издательство: ООО "Месол", С. 430
19	тезисы докладов	Особенности электрохимического поведения циркония и ниобия в расплавах хлоридов щелочных металлов в процессе обращения с металлическими радиоактивными отходами на примере облученных циркониевых каналов реакторов РБМК	Нечаев П.И., Хвостов С.С., Лапин Ю.В., Половов И.Б., Сандалов И.П.	РАДИОХИМИЯ-2022, X Российская конференция с международным участием. Москва, 2022. Издательство: ООО "Месол". С. 413

20	статья	Атомные батареи конденсаторного типа нового поколения с жидким электролитом	Рисованный В.Д., Костылев А.И., Душин В.Н., Фирсин Н.Г., Синельников Л.П., Бутаков Д.С., Николкин В.Н.	Атомная энергия. Том: 132. № 3. Год: 2022. С. 175-178
21	статья	Mössbauer spectroscopy investigation of the effect of a high-dose neutron irradiation on the atomic redistribution in the industrial steel EP823	Kozlov Kirill, Shabashov Valery, Kozlov Alexander, Sagaradze Victor, Semyonkin Vladimir, Panchenko Valery, Zamatovskii Andrey, Kataeva Natalya, Nikitina Anastasia	Journal of Nuclear Materials Volume 558, January 2022, 153384, <a href="https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153384">https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153384</a> ,
22	статья	Using the Monte-Carlo method to optimize the radiation protection composition of containers for storing conditioned liquid waste	Litovchenko V. Yu., Vasutin N. A., Kozlov A. V., Seleznev E. N., Tashlykov O. L.	AIP Conference Proceedings 2466, 020005 (2022); <a href="https://doi.org/10.1063/5.0090065">https://doi.org/10.1063/5.0090065</a>
23	статья	Crystallographic Features of Phase Transformations during the Continuous Cooling of a Ti6Al4V Alloy from the Single-Phase $\beta$ -Region	Naschetnikova I.A., Stepanov S.I., Redikultsev A.A., Yarkov V. Yu., Zorina M.A., Lobanov M.L.	Materials (Basel) . 2022 Aug 24;15(17):5840. doi: 10.3390/ma15175840. <a href="https://mdpi-res.com/d_attachment/materials/materials-15-05840/article_deploy/materials-15-05840-v3.pdf?version=1661760310">https://mdpi-res.com/d_attachment/materials/materials-15-05840/article_deploy/materials-15-05840-v3.pdf?version=1661760310</a>
24	статья	Synthesis of Lithium Phosphorus Oxynitride (LiPON) Thin Films by Li <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> Anodic Evaporation in Nitrogen Plasma of a Low-Pressure Arc Discharge	Gavrilov, N., Kamenetskikh, A., Tretnikov, P., Nikonov A., Sinelnikov L., Butakov D., Nikolkin, V., Chukin, A.	Membranes, 2022, 12(1), 40 <a href="https://www.mdpi.com/2077-0375/12/1/40">https://www.mdpi.com/2077-0375/12/1/40</a>

25	статья	Experimental investigations of temperature conditions in the storage pit of IVV-2M research nuclear reactor	Shumkov, D.E., Tashlykov, O.L., Glukhov, S.M.	AIP Conference Proceedings 2466, 070006 (2022); <a href="https://doi.org/10.1063/5.0088848">https://doi.org/10.1063/5.0088848</a>
26	патент	Ампульное облучательное устройство для реакторных испытаний	Бельтюков И.Л., Васютин Н.А., Зырянова А.А., Кощев К.Н., Литовченко В.Ю., Шабельников Е.В., Мокрушин А.А., Кузнецов В.В., Сериков В.С.	патент на изобретение № 2781552 от 13.10.2022
27	тезисы доклад а на конферен ции	Состояние и работоспособность топливных каналов и каналов СУЗ реакторов РБМК-1000 на завершающем этапе эксплуатации (по результатам послереакторных исследований)	Аверин С.А., Цыгвинцев В.А.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 17
28	тезисы доклад а на конферен ции	Экспериментальные исследования коррозии стали AISI 316L в обоснование ресурса хранения сорбционных колонн АЭС «Фукусима-дайичи»	Голосов О.А., Хвостов С.С., Глушкова Н.В., Бахтина Е.А., Цупрун Ю.И., Исинбаев А.Р., Козлова А.А., Ярков В.Ю.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 18-19
29	тезисы доклад а на конферен ции	Методика расчета выгорания ОТВС ИВВ-2М с применением ПС MCU-PTR	Зырянова А.А., Метелева Ю.В., Полозов К.В.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных

				материалов». Москва, 2022, С. 39-40
30	тезисы доклад а на конференции	Результаты облучения теплофизического макета облучательного устройства, содержащего функциональные материалы бланкета термоядерного реактора, в активной зоне реактора ИВВ-2М	Бельтюков И.Л., Варивцев А.В., Васютин Н.А., Кощеев К.Н., Литовченко В.Ю., Предеина М.А., Шабельников Е.В.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 41
31	тезисы доклад а на конференции	Расчётно-экспериментальное обоснование проведения реакторных ампульных испытаний экспериментальных образцов микротвэлов и топливных компактов ВТГР	Литовченко В.Ю., Васютин Н.А., Шабельников Е.В., Ротман Д.Н., Сериков В.С., Мокрушин А.А.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 42
32	тезисы доклад а на конференции	Разработка экспериментальной установки системы пассивного отвода тепла шахты-хранилища ИЯУ ИВВ-2М	Шумков Д.Е., Новгородский В.С., Ташлыков О.Л., Глухов С.М.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 43



33	тезисы доклад а на конференции	Влияние нейтронного облучения на физико-механические свойства реакторных сталей	Ладейщиков К.М., Козлов А.В., Ярков В.Ю.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 51-52
34	тезисы доклад а на конференции	Влияние реакторного облучения на коррозионное поведение стали ЭП-823Ш в свинце, содержащем кислород, при 490 и 570 °С	Козлова А.А., Голосов О.А., Ярков В.Ю., Исинбаев А.Р., Бахтина Е.А., Цупрун Ю.И., Рычков В.С., Шабельников Е.В.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 53-54
35	тезисы доклад а на конференции	Влияние температуры и содержания хлор ионов на питинговую коррозию стали AISI 316L	Бахтина Е.А., Голосов О.А., Хвостов С.С., Козлова А.А., Цупрун Ю.И., Зарубина О.А.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 65-66
36	тезисы доклад а на конференции	Экспериментальные исследования целевой коррозии стали AISI 316L в водных растворах, содержащих хлор ионы	Цупрун Ю.И., Голосов О.А., Хвостов С.С., Бахтина Е.А., Козлова А.А., Ярков В.Ю.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 67-68

37	тезисы доклад а на конференции	Зависимость напряженно-деформированного состояния кольцевого образца при внецентральной растяжении от повреждающей дозы	Нежданов А.Г., Карагерги Р.П., Барсанова С.В., Евсеев М.В., Коновалов А.В., Козлов А.В.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 69
38	тезисы доклад а на конференции	Углеродные нанотрубки марки «Деатлон» как электродный материал суперконденсатора	Келлер Н.В., Бутаков Д.С., Николкин В.Н., Золотавин А.А., Аскарова А.А., Хейнштейн В.Я.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 71-72
39	тезисы доклад а на конференции	Исследование углеродных наноструктур, меченых радиоизотопным источником излучения	Золотавин А.А., Николкин В.Н., Бутаков Д.С.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 73
40	тезисы доклад а на конференции	Неоднородность деформационного упрочнения материала оболочки на различных участках ТВЭЛА после облучения в активной зоне реактора БН-600	Карагерги Р.П., Козлов А.В., Евсеев М.В., Барсанова С.В., Портных И.А.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 80-81

41	тезисы доклада на конференции	Структурное состояние стали 316L в зоне сварного шва	Ярков В.Ю., Бахтина Е.А., Цупрун Ю.И., Козлова А.А., Хвостов С.С.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 82-84
42	тезисы доклада на конференции	Анализ поврежденности материала оболочек твэлов реактора	Карагерги Р.П., Нежданов А.Г., Шило О.Б., Евсеев М.В., Барсанова С.В., Козлов А.В., Портных И.А.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 85-86
43	тезисы доклада на конференции	Синтез углеродных матриц, допированных SR, для использования в качестве электродов в источниках электрической энергии	Аскарлова А.А., Николкин В.Н., Бутаков Д.С., Синельников Л.П.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 106-107
44	тезисы доклада на конференции	Физические особенности и модель работы самозаряжающегося автономного источника питания	Рисованый В.Д., Бутаков Д.С., Николкин В.Н., Синельников Л.П.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 108-109

45	тезисы доклада на конференции	Исследование влияния условий измерения активности счетного образца, содержащего радионуклиды $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , жидкосцинтилляционным методом на приборе HIDEБ 300 SL	Хейнштейн В.Я., Аскарова А.А., Бутаков Д.С., Николкин В.Н.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 110-111
46	тезисы доклада на конференции	Особенности электрохимического поведения GR и NB в расплавах хлоридов щелочных металлов в процессе обращения с металлическими РАО	Лапин Ю.В., Хвостов С.С., Нечаев П.И., Половов И.Б., Сандалов И.П.	Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. Тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022, С. 125-126
47	статья	Влияние нейтронного облучения на структуру и свойства нержавеющей сталей ферритно-мартенситного класса	Устинов А.Е., Ярков В.Ю., Пастухов В.И.	Уральская школа молодых металлургов = Ural school for young metal scientists. Материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Екатеринбург, 2022. С. 248-252
48	статья	Структурно-текстурная наследственность в сплаве ZR - 2,5 %NB	Ярков В.Ю., Лобанова Л.А., Зорина М.А., Устинов А.Е., Пастухов В.И.	Уральская школа молодых металлургов = Ural school for young metal scientists. Материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Екатеринбург, 2022. С. 243-247

49	статья	Кристаллографические особенности мартенситного превращения в сплаве ZR - 2,5 %NB	Ярков В.Ю., Устинов А.Е., Пастухов В.И.	Уральская школа молодых металлургов = Ural school for young metal scientists. Материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Екатеринбург, 2022. С. 238-242
50	статья	Size determination of microstructure elements for nanocrystalline fine metal-type alloy	Nikul'chenkov N.N., Isinbaev A.R.	Уральская школа молодых металлургов = Ural school for young metal scientists. Материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Екатеринбург, 2022. С. 154-157
51	тезисы докладов на конференции	Влияние высокодозного нейтронного облучения на структурно фазовые превращения в индустриальной стали ЭП823	Козлов К.А., Шабашов В.А., Сагардзе В.В., Заматовский А.Е., Семенкин В.А., Козлов А.В., Панченко В.Л.	Мёссбауэровская спектроскопия и ее применения (XVI ICMSA) Тезисы докладов XVI Международной конференции. Институт физики металлов УрО РАН Уральское отделение Российской академии наук Уральский федеральный университет Московский государственный университет ООО «Сигнифика». 2022. С. 80-81.

52	тезисы доклада на конференции	Влияние механических напряжений на структурно-фазовые переходы в индустриальных сталях ЭП823 И ЭП823-ДУО при высокодозном нейтронном облучении	Козлов К.А., Шабашов В.А., Сагарадзе В.В., Заматовский А.Е., Козлов А.В., Панченко В.Л.	Мёссбауэровская спектроскопия и ее применения (XVI ICMSA) Тезисы докладов XVI Международной конференции. Институт физики металлов УрО РАН Уральское отделение Российской академии наук Уральский федеральный университет Московский государственный университет ООО «Сигнифика». 2022. С. 90-91.
53	статья	Вычисление критического диаметра пор для аустенитной стали ЧС68 после облучения нейтронами	Исинбаев А.Р., Козлов А.В., Портных И.А.	Уральская школа молодых металлургов = Ural school for young metal scientists. Материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Екатеринбург, 2022. С. 496-499
54	статья	Гидридные скопления, образующиеся в сплаве ZR - 2,5 %NB, при длительном низкотемпературном нейтронном облучении	Самедов В.К., Аверин С.А., Исинбаев А.Р., Ярков В.Ю.	Уральская школа молодых металлургов = Ural school for young metal scientists. Материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Екатеринбург, 2022. С. 435-439

55	статья	Электрофинирование циркония из сплавов ZR-NB в расплавах хлоридов щелочных металлов	Сандалов И.П., Половов И.Б., Нечаев П.И., Лапин Ю.В., Хвостов С.С.	Электрохимия в распределенной и атомной энергетике. Сборник трудов Первого Всероссийского семинара «Электрохимия в распределенной и атомной энергетике» (посвященный 90-летию Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова). Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Институт высокотемпературной электрохимии Уральского Отделения Российской академии наук. 2022. С. 303-304
56	статья	Субструктура дисперсионного U-9% MO/AL топлива с высоким выгоранием	Богданов С.Г., Голосов О.А., Пирогов А.Н., Лютикова М.С., Глушкова Н.В.	Физика металлов и металловедения. Том: 123, № 11, 2022. С. 1218-1226
57	статья	The Substructure of the Dispersion U-9% Mo/Al Fuel with High Burnup	Bogdanov S.G., Golosov O.A., Pirogor A.N., Lyutikova M.S., Glushkova N.V.	Physics of Metals and Metallography, 2022, Vol. 123, No. 11, pp. 1147-1155
58	статья	Модифицированная модель кондорского для описания процессов перемагничивания постоянных магнитов ND-FE-B	Уржумцев А.Н., Мальцева В.Е., Ярков В.Ю., Волегов А.С.	Физика металлов и металловедения. Том: 123, № 11, 2022. С. 1124-1130
59	заявка на изобретение	Способ определения скорости коррозии сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях, содержащих кислород	Голосов О.А., Козлова (Осинцева) А.А., Хвостов С.С.	№ 2022122572/28(048138) от 19.08.2022

60	статья в сборнике трудов конференции	Электрорафинирование циркония из сплавов ZR-NB в расплавах хлоридов щелочных металлов	Сандалов И.П., Половов И.Б., Нечаев П.И., Лапин Ю.В., Хвостов С.С.	Электрохимия в распределенной и атомной энергетике. Сборник трудов Первого Всероссийского семинара «Электрохимия в распределенной и атомной энергетике». 2022. С. 303-304
61	статья	Характеристика нейтронных полей на исследовательских ядерных реакторах бассейного типа	Пышкина М.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В., Екидин А.А., Назаров Е.И., Романова М.А., Аникин М.Н.	Радиационная гигиена/ RadiationHygiene. Том: 15, № 4, 2022. С. 58-68

### ПРЕМИИ И НАГРАДЫ

По итогам 2022 года особо значимые результаты работы и достижения АО «ИРМ» отмечены государственными наградами Российской Федерации и наградами Госкорпорации «Росатом».

За большой вклад в развитие научной и производственной деятельности атомной отрасли, в обеспечение повышения обороноспособности и развитие научно – технического потенциала работники Института получили государственные награды:

– Медаль РФ "За заслуги в освоении атомной энергии" вручена начальнику лаборатории радиационных технологий **Джанелидзе Арсену Александровичу**;

– Почетное звание РФ “Заслуженный работник атомной промышленности” присвоено начальнику радиохимической лаборатории **Коренковой Альме Вениаминовне** и старшему научному сотруднику лаборатории радиоизотопных источников питания **Николкину Виктору Николаевичу**.

– Благодарность Президента Российской Федерации вынесена ведущему инженеру лаборатории перспективных материалов отделения радиационного материаловедения **Лютиковой Марине Сергеевне** и руководителю группы испытаний топливных и конструкционных материалов отдела реакторных испытаний **Шабельникову Евгению Вадимовичу**.

За вклад в развитие научной и производственной деятельности атомной отрасли, в обеспечение повышения обороноспособности и развитие научно – технического потенциала знаками отличия Госкорпорации «Росатом» награждены 7 работников АО «ИРМ»:

– Нагрудным знаком отличия “Академик И.В. Курчатов” 2 степени - старший научный сотрудник отделения радиационного материаловедения **Голосов Олег Александрович**;

– Нагрудным знаком отличия “Академик И.В. Курчатов” 4 степени - начальник лаборатории конструкционных материалов и нанотехнологий отделения радиационного материаловедения **Пастухов Владимир Иванович**;

– старший научный сотрудник лаборатории конструкционных материалов и нанотехнологий отделения радиационного материаловедения **Цыгвинцев Владимир Александрович**;



- руководитель направления отдела реакторных испытаний **Бельтюков Игорь Леонидович**;
- Знаком отличия "За заслуги перед атомной отраслью" 3 степени
- инженер группы поверки отдела главного метролога **Стукова Светлана Ювенальевна**.

Знаком отличия "За вклад в развитие атомной отрасли" 2 степени:

- начальник группы физики реактора отдела эксплуатации исследовательской ядерной установки **Зырянова Александра Анатольевна**.

Также приказом Генерального директора Госкорпорации "Росатом" Алексея Евгеньевича Лихачева 17 работников АО "ИРМ" награждены юбилейной памятной медалью "75 лет атомной отрасли":

**Асипцов Олег Иванович**

**Боярских Николай Юрьевич**

**Гомозов Игорь Геннадьевич**

**Евсеев Михаил Васильевич**

**Животов Сергей Анатольевич**

**Замятина Антонина Афанасьевна**

**Кузина Татьяна Львовна**

**Морковкин Сергей Дмитриевич**

**Николкин Виктор Николаевич**

**Панченко Валерий Леонидович**

**Рычков Владимир Сергеевич**

**Рязанов Владислав Валерьевич**

**Синельников Леонид Прокопьевич**

**Цыгвинцев Владимир Александрович**

**Чернецов Михаил Васильевич**

**Чеснокова Ирина Борисовна**

**Шакиров Закир Нигматбаевич**

В 2022 году АО "ИРМ" стал победителем регионального этапа всероссийского конкурса Министерства труда «Российская организация высокой социальной эффективности» в номинации «За сокращение производственного травматизма и профессиональной заболеваемости в организациях производственной сферы». Благодарственное письмо за победу в конкурсе вручил коллективу института губернатор Свердловской области Евгений Владимирович Куйвашев.

## ИТОГИ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Выпущен Сборник тезисов докладов (рисунок 25), представленных на научно-технической конференции по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов, 12-16 сентября 2022 года, Екатеринбург. Содержание сборника: Пленарные доклады - 4 доклада;

Секция 1. Ядерные реакторы и технологии - 16 докладов;

Секция 2. Радиационное материаловедение - 20 докладов;

Секция 3. Радиоизотопные технологии для промышленности и медицины – 13 докладов;

Секция 4. Ядерный топливный цикл и обращение с РАО -11 докладов.

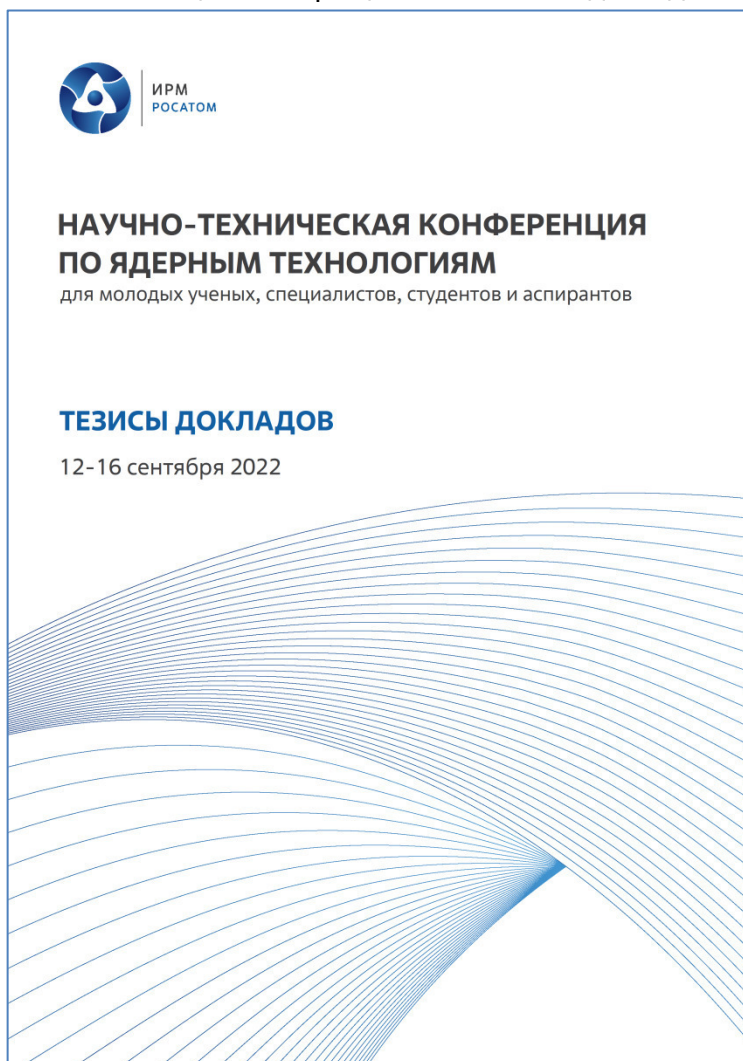
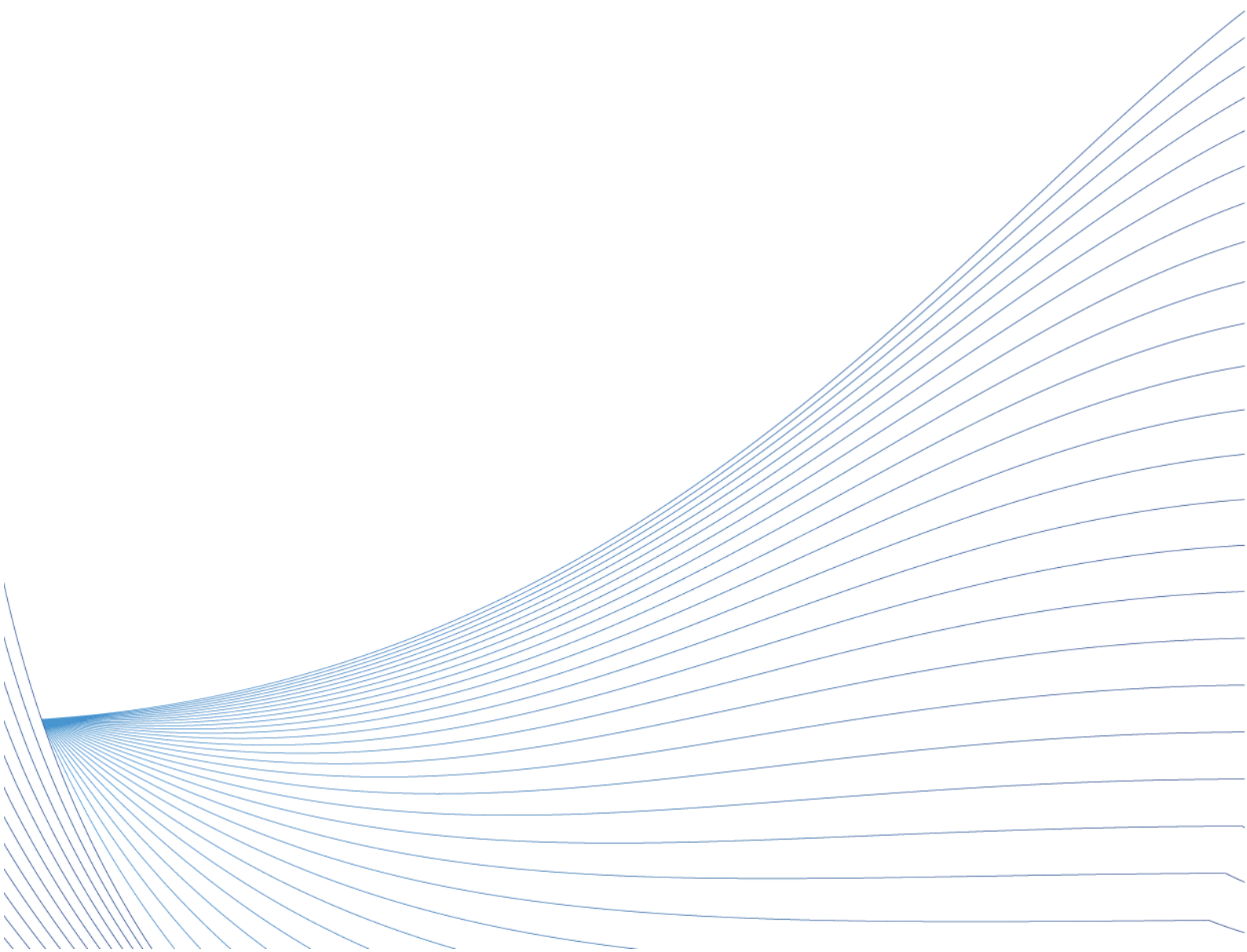


Рисунок – 25. Обложка сборника тезисов докладов

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ



## ВЫСТАВКИ СЕМИНАРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

***Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов состоялась 12-16 сентября 2022 года в г. Екатеринбург, организатор АО «ИРМ».***

Целью конференции является вовлечение молодых специалистов, студентов и аспирантов в решение актуальных научно-технических задач атомной отрасли и укрепление связи между предприятиями и ВУЗами.

В конференции приняли участие 70 представителей от 15 организаций Госкорпорации «Росатом», институтов Российской Академии Наук и ВУЗов, из них 47 участников являются молодыми учеными до 35 лет. Было представлено 54 доклада.

В докладах были освещены основные тематические направления конференции:

- Ядерные реакторы и технологии;
- Замкнутый ядерный топливный цикл;
- Радиоизотопные технологии для промышленности и медицины;
- Радиационное материаловедение;
- Цифровые технологии в науке.

В рамках конференции проведен Круглый стол на тему «Перспективы нейтронных исследований в Институте реакторных материалов» в обсуждении данной темы приняло участие 12 представителей разных предприятий.

На конференции проводился конкурс на лучший доклад. Дипломами за лучший доклад награждены 5 участников конференции:

- Бахтина Елена Александровна – АО «ИРМ»;
- Пенязь Милена Алексеевна – АО «Наука и инновации»;
- Клауз Артём Вадимович – НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ;
- Казаков Виталий Анатольевич – ФГУП ПО «МАЯК»;
- Ротман Дмитрий Николаевич – АО «ИРМ».

***Выездная сессия Научного Совета РАН «Радиационная физика твердого тела», 21-23 ноября 2022, Заречный***

Выездная сессия Научного Совета РАН по проблеме «Радиационная физика твердого тела», проводилась в г. Заречном 21-23 ноября 2022 года на базе АО «ИРМ».

На заседании заслушаны важнейшие результаты в области радиационной физики твердого тела, полученные в 2022 году. В заседаниях сессии приняло участие 42 человека. Было представлено 23 доклада, 9 из которых представлены молодыми научными сотрудниками АО «ИРМ» и получили высокие оценки от членов совета РАН.

### ***Семинар-совещание***

В городе Заречном 18-19 августа 2022 года проведен Семинар-совещание по обсуждению хода выполнения и результатов проведения реакторных испытаний и послереакторных исследований микротвэлов и топливных компактов. В семинаре-совещании приняли участие 26 человек из АО «Концерн Росэнергоатом», АО «НИИ НПО «ЛУЧ», АО «ОКБМ Африкантов», АО «ГНЦ НИИАР», АО «ВНИИНМ», АО «ИРМ» НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИИГрафит».

### ***Международная выставка «Технопром - 2022»***

АО «ИРМ» приняло участие на международном форуме и выставке технологического развития «Технопром – 2022» с 23 по 26 августа. На выставке состоялся круглый стол «ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА: УСКОРИТЕЛЬНЫЕ И РЕАКТОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА СЛУЖБЕ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ». Представители института провели встречу с сибирскими компаниями, потенциальными партнерами по разработке новых направлений продуктов и услуг. По результатам было принято решение увеличить

количество совместных встреч между исполнительной властью, представителями медицинских учреждений и компаний производителей техники и радиофармп репаратов.

### ***Международная военно-техническая выставка «Армия – 2022»***

С 15 по 21 августа 2022 г. АО «ИРМ» приняло участие в международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2022» в рамках объединенного стенда Госкорпорации «Росатом». Институт реакторных материалов продемонстрировал два экспоната. Первый – образец автономного источника электрического питания нового типа. По электрическим и энергетическим характеристикам он превышает лучшие отечественные и мировые аналоги. Срок его службы может составить 25 и более лет без подключения к внешнему источнику электрического питания. Второй – образец комплекта для транспортировки радиоизотопной продукции, которая может использоваться как для диагностики и лечения в медицине, так и для дефектоскопии в промышленности. Научные компетенции института способствуют постоянному улучшению характеристик создаваемой изотопной продукции.

### ***Выставка «Иннопром – 2022»***

АО «ИРМ» приняло участие на международной промышленной выставке Иннопром-2022 в ЭКСПО-центре г. Екатеринбург. В 2022 году страной - партнёром является Казахстан. На стенде Госкорпорации "Росатом" было представлено вниманию посетителей большое количество высокотехнологичных экспонатов. АО «ИРМ» продемонстрировал уникальную разработку: автономные радиоизотопные источники питания, предназначенные для микроэлектронной техники. Представленные источники способны работать в широком диапазоне температур (от -65 до + 130 градусов Цельсия) со сроком службы 25 и более лет и не нуждаются в периодическом подключении к внешнему источнику тока для подзарядки.

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ПАРТНЕРАМИ.**

#### ***Взаимодействие с ФГБУН ИЭФ УрО РАН***

В рамках взаимодействия с ФГБУН ИЭФ УрО РАН проводилась оптимизация и освоение опытной технологии изготовления конденсаторных ячеек на основе электролита LiPON, синтезируемого методом термического испарения в азотной плазме, обеспечивающей повышение ионной проводимости и стабилизацию свойств пленок твердого электролита при одновременном изготовлении партии образцов.

#### ***Взаимодействие с УрФУ***

Совместно с Уральским Федеральным Университетом проводятся широкомасштабные структурные исследования циркония и его сплавов для формирования необходимых физико-механических и коррозионных свойств, что позволило разработать технологии для изготовления конструкционных и функциональных деталей реакторов на тепловых нейтронах. Однако, в настоящее время, проблема воздействия облучения на структурное состояние циркониевых сплавов остается актуальной. В частности, особо важными остаются проблемы наводороживания, коррозионных повреждений и радиационного роста сплавов на основе циркония под действием длительного нейтронного облучения. Причиной появления вышеуказанных проблем являются несколько процессов, один из которых связан со структурно-текстурным состоянием материала. Подробно полученная информация описана в разделе на странице 70.

## РАБОТА НТС ПО РАССМОТРЕНИЮ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Научно-технический совет АО «ИРМ» является постоянно действующим коллегиальным и совещательным органом, созданным на основании Устава АО «ИРМ» и Положения о научно-техническом совете АО «ИРМ» с целью формирования научно-технической политики Общества, в том числе оптимизации принимаемых научно-технических и методических решений по развитию новых научно-производственных направлений и экспериментальной базы Общества, координации научно-технической деятельности АО «ИРМ».

Председатель НТС – Варивцев А.В., заместитель директора по научной и инновационной деятельности.

Заместитель председателя НТС – Синельников Л.П., ученый секретарь.

В состав НТС АО «ИРМ» входят ведущие ученые и специалисты, имеющие большой опыт и глубокие профессиональные знания, представляющие основные научно-технические направления деятельности АО «ИРМ». Состав НТС – 20 человек, из них два доктора и семь кандидатов наук.

В своей работе научно-технический совет руководствуется «Положением о научно-техническом совете АО «ИРМ». Персональный состав научно-технического совета утверждается приказом директора АО «ИРМ».

В 2022 году проведено двадцать три заседания НТС. На них рассмотрены научно-технические проблемы и вопросы по организации научной и производственной деятельности АО «ИРМ».

Темы заседаний научно-технического совета:

– Рассмотрение и утверждение темы диссертационной работы инженера 2 кат. лаборатории материаловедческих исследований Аскаровой А.А.

– Первичные результаты реакторного эксперимента с функциональными материалами термоядерных реакторов в рамках контракта с Marubeni/QST (Япония).

– Технические возможности реактора ИВВ-2М для реализации запланированных НИОКР и программ по наработке изотопной продукции.

– Развитие изотопного производства в АО «ИРМ».

– Публикационная активность научных работников АО «ИРМ».

– Статус подготовки кандидатских и докторских диссертаций научными работникам АО «ИРМ».

– Результаты дореакторных исследований и реакторных испытаний топлива ВТГР.

– Результаты исследования СНУП-топлива после выгорания 1–3,5% т.а.

– О развитии материаловедческого комплекса на базе АО «ИРМ».

– Результаты выполнения НИОКР «Разработка прогнозной модели протекания коррозионных процессов в материалах сорбционных колонн АЭС «Фукусима-Дайичи».

– Рассмотрение диссертационной работы «Исследование коррозионного поведения конструкционных материалов в расплавах хлоридов щелочных металлов, содержащих хлорид свинца при пирохимической переработке СНУП ОЯТ», представленной начальником лаборатории технологий обращения с РАО и коррозионных процессов Хвостовым С.С., для направления в диссертационный совет ИВТЭ УрО РАН на соискание степени кандидата химических наук по специальности - Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

– Концепция сооружения исследовательского комплекса с новой перспективной ИЯУ на второй площадке АО «ИРМ».

– Рассмотрение научного годового отчета АО «ИРМ» за 2021 год.

–Рассмотрение проекта «Разработка технологии извлечения бора из облученных элементов СУЗ реакторов на быстрых нейтронах».

–Рассмотрение результатов НИОКР, выполненных в рамках договоров с организациями, входящими в контур Госкорпорации «Росатом».

–Рассмотрение результатов проекта ЕОТП МТ-70 в части облучательного устройства стенда «Урал» с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

–Рассмотрение информационно-аналитических отчетов АО «ИРМ» за 2022 год, подготовленных для Отраслевого центра аналитических исследований и разработок:

–«Радиационно-индуцированные явления в конструкционных материалах, лимитирующие ресурс эксплуатации внутриреакторных элементов», этап 2022 года, руководитель темы Козлов А.В.

–«Обзор литературных данных с анализом методов определения показателей коррозии сталей в свинцовом теплоносителе», научный руководитель Голосов О.А.

–«Модернизация и создание новых экспериментальных комплексов и установок научно-производственной базы АО «ИРМ», руководитель работ Русских И.М.

–Подготовка и рассмотрение отзывов на диссертационные работы сторонних организаций, в том числе как ведущая организация (2 отзыва).

–Проведение научно-технического семинара «Вклад академической и вузовской науки в формирование кадрового потенциала Госкорпорации «Росатом» в рамках расширенного заседания НТС АО «ИРМ».

–Рассмотрение заявок на проекты для включения в ЕОТП НИОКР Госкорпорации «Росатом» на 2023 год.

По всем рассмотренным темам заседаний приняты конкретные решения НТС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2022 году в АО «ИРМ» традиционно продолжались начатые в предыдущие годы научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на обеспечение безопасной работы материалов и конструкций активной зоны энергоблоков атомных электростанций, находящихся в эксплуатации, а также и участие в создании перспективных реакторных установок для ядерной энергетики, космических исследований и РУ специального назначения. Для достижения поставленных целей используются уникальные объекты созданной экспериментальной базы, которая включает стенды для проведения реакторных и всесторонних послереакторных материаловедческих исследований в рамках программ «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии» (РТТН), Единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом», проекта «Прорыв», Стратегии развития двухкомпонентной атомной энергетики до 2050 года и других программ перспективного развития атомной энергетики России.

Применяемые в работах расчетные, прикладные исследования и экспериментальные разработки, направленные на создание и внедрение новых технологий, материалов, а также на существенное улучшение характеристик уже созданных и внедренных объектов атомной энергии, используются для управления сроком службы конструкций, материалов активных зон ядерных энергетических реакторов и подготовки обоснований по продлению службы и безопасности ядерно-энергетических установок.

Возможность проведения экспериментальных реакторных исследований в важнейших направлениях развития двухкомпонентной атомной энергетики России обеспечивается за счет создания современных реакторных стендов, оснащенных всеми необходимыми средствами контроля режимов проведения испытаний.

Некоторые из созданных в АО «ИРМ» стендов обеспечивают уникальные по мировым меркам методологические возможности проведения испытаний материалов и элементов конструкций инновационных реакторных установок различного назначения.

Комплекс защитных камер целенаправленно оснащен оборудованием и методиками исследований облученных материалов и конструкций, обеспечивающих получение экспериментальных результатов, обеспечивающих всестороннюю оценку их служебных характеристик в условиях эксплуатации, с учетом специфических параметров эксплуатации: температуры и состава среды, механических воздействий, включая циклические, а также особенностей воздействия реакторного облучения.

К объектам исследований в КЗК, в первую очередь, относятся все материалы и изделия после облучения в реакторе ИВВ-2М. К ним относятся как конструкционные и функциональные материалы, так и штатные и инновационные виды топлива. Оснащенность КЗК в достаточно полной мере обеспечивает получение результатов, необходимых для обоснования работоспособности материалов как для режимов эксплуатации существующих энергоблоков, так и для условий вновь разрабатываемых РУ. Комплекс оборудования и методик постоянно совершенствуется под соответствующие изменения требований к материаловедческим исследованиям в процессе развития АЭ.

Особое внимание обращается на развитие методик исследований объектов, поступающих в КЗК после эксплуатации в действующих реакторных установках. В течение многих лет развиваются и совершенствуются оборудование и методики по теме послереакторных исследований конструкционных материалов и топлива реакторов БН при текущей эксплуатации. При этом, важнейшей задачей исследований является поиск путей повышения ресурса безопасной эксплуатации элементов активной зоны. В



частности, в 2022 году завершены комплексные послереакторные исследования твэлов с оболочками из стали ЭК164-ИД х.д., изготовленными по усовершенствованной технологии, а также с оболочками из стали ЭК164-ИД х.д., изготовленными по усовершенствованной технологии АТОН-2.

По итогам работ 2020-2022 годов проведено обобщение данных послереакторных исследований оболочек твэлов из стали ЭК164-ИД х.д., проведена оценка остаточного ресурса и даны рекомендации по дальнейшему использованию усовершенствованной стали ЭК164-ИД х.д. в качестве материала оболочек твэлов.

Выполнены работы по направлению «Разработка физических моделей, алгоритмов расчёта для определения скорости радиационной ползучести элементов конструкций ядерных реакторов на быстрых нейтронах и проведение послереакторных исследований по определению величины деформации ползучести»

Проведены работы по обоснованию работоспособности каналов СУЗ реакторов РБМК-1000, которые работают за пределами проектного срока службы, что является одной из составных задач для продления срока эксплуатации энергоблоков.

Полученные результаты исследований каналов СУЗ входят составной частью в обоснование безопасной эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК-1000 в концепции «45+». Продление срока эксплуатации энергоблоков на 5 лет позволит выработать более 245 млрд. кВт·ч.

В 2022 году завершена работа в рамках проекта Единого Отраслевого Тематического плана Госкорпорации «Росатом» по теме: «Разработка автономных источников питания и накопителей энергии на основе радиоизотопов с бета-распадом нового поколения с повышенными вольт-амперными характеристиками».

Проект направлен на создание атомных батарей нового типа, в которых используется бета-излучающий нуклид с высокой энергией излучения -  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  с удельной мощностью 6700 мкВт/Ки. По результатам проведённых энергетических испытаний, экспериментально получены энергетические характеристики АИП при постоянной нагрузке, превышающие аналогичные характеристики радиоизотопных источников питания, присутствующих на мировом уровне.

## **Список сокращений и аббревиатур**

НИОКР – научно-исследовательская и конструкторская работа  
БР-1200 – реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем  
РУ БРЕСТ-ОД-300 – реакторная установка с тяжелым жидким свинцовым теплоносителем  
ВТГР – высокотемпературный газовый реактор  
СУЗ – система управления защитой  
РБМК-1000 – реактор большой мощности канальный  
ОВАО – остеклованные высокоактивные отходы  
АИП – автономный источник питания (радиоизотопный)  
СФТИ – свердловский физико-технический институт (ныне АО «ИРМ»)  
СФ НИКИЭТ – свердловский филиал НИКИЭТ (ныне АО «ИРМ»)  
КЗК – комплекс защитных камер  
ГДТ, ГДТ-М, ГДО-М – марки термостойких сорбентов.  
АЭ – атомная энергия  
ТВС – тепловыделяющая сборка  
ЖРО – жидкие радиоактивные отходы  
ТРО – твердые радиоактивные отходы  
ГПД – газовые продукты деления  
АЗТ –  
ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия  
ТЖМТ – тяжелый жидкий металлический теплоноситель  
ЭУ – экспериментальное устройство  
МТ – микротопливо  
АкЗ – активная зона (ядерного реактора)  
ВАО – высокоактивные отходы  
ОВАО – остеклованные высокоактивные отходы  
КС – компенсирующий стержень (в системе управления защитой реакторной установки)  
ОЯТ – отработавшее ядерное топливо  
СЭМ –  
ЗБО – зона большого обогащения (по длине твэла)  
ЗМО – зона малого обогащения (по длине твэла)  
ПРИ – послереакторные исследования  
ЗТВ – зона термического влияния (сварного соединения)  
ЭЛС – электронно-лучевая сварка  
ЩК – щелевая коррозия  
КМ – конструкционный материал  
КПД – коэффициент полезного действия  
ОКР – опытно-конструкторская работа  
ЭО – экспериментальный образец  
РИД, – результат интеллектуальной деятельности  
ЯЭУ – ядерная энергетическая установка