ИРМ
РОСАТОМ

80 ЛЕТ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

НАУЧНЫЙ ГОДОВОЙ ОТЧЕТ

Об основных исследовательских работах, выполненных в 2025 году

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
www.irm-atom.ru

г. Заречный, 2026 г.

Госкорпорация «Росатом»
АО «Росатом Наука»
АО «ИРМ»

НАУЧНЫЙ ГОДОВОЙ ОТЧЕТ АО «ИРМ»

2025

РЕЗУЛЬТАТЫ
ДОСТИЖЕНИЯ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Заречный, 2026 год

УДК: 620.18

ГРНТИ: 58.33.09

Научный годовой отчет акционерного общества «Институт реакторных материалов» содержит информацию о результатах основных научно-исследовательских работ, выполненных обществом в 2025г. — Заречный, АО «ИРМ», 2026. 97 с.

В отчет включены данные о выполненных в 2025 году исследованиях по основным направлениям научно-технической деятельности АО «ИРМ», в том числе:

— определение показателей коррозии стали ЭП302-Ш после стендовых реакторных испытаний в свинцовом теплоносителе;

— результаты реакторных испытаний и последующих материаловедческих исследований углеродных материалов для атомной энерготехнологической станции (АЭТС) на основе высокотемпературного газоохлаждаемого реактора;

— проведение реакторных испытаний и последующих материаловедческих исследований ядерного топлива для ядерных реакторов различного типа;

— результаты исследований материалов элементов конструкций после длительной эксплуатации в действующих энергоблоках РБМК;

— разработка и внедрение новых технологий для получения радиоизотопных продуктов для медицины и промышленности.

Приведены выполненные работы по разработке оборудования, предназначенного для освоения новых методик реакторных испытаний и исследований облученных материалов в условиях защитных камер.

В отчете также представлены итоги издательской деятельности, участия научных сотрудников в работе семинаров, конференциях, выставках, отражено взаимодействие с партнерами научных учреждений РФ и зарубежных специалистов.

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

© Акционерное общество

«Институт реакторных материалов»

(АО «ИРМ»), 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5

ОБ ИНСТИТУТЕ 7

История АО «ИРМ» 8

Основные направления научных исследований и роль института в научном сообществе АО «Росатом Наука» 11

Перспективные направления исследований 12

Обновление экспериментальной базы 13

РЕЗУЛЬТАТЫ 18

Определение показателей коррозии стали ЭП302-Ш после испытаний в свинце при 570 °С в течение 2700 и 5200 ч. Часть 1: Результаты неразрушающего денсиметрического метода 19

Определение показателей коррозии стали ЭП302-Ш после испытаний в свинце при 570 °С в течение 2700 и 5200 ч. Часть 2: Результаты определения гравиметрическим методом 24

Определение показателей коррозии стали ЭП302-Ш после испытаний в свинце при 570 °С в течение 2700 и 5200 ч. Часть 3: Результаты определения геометрическим методом 29

Методика оценки длительности периода пассивации поверхности ОУ стенда «Урал-коррозия» при проведении коррозионных испытаний 36

Оценка скорости потока свинца в ОУ стенда «Урал-коррозия» при проведении коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш при 570 °С 41

Исследования образцов конструкционного графита, разработанного в рамках проекта по созданию атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (ВТГР) 45

Реакторные испытания и послереакторные исследования углерод-углеродных композиционных материалов и их клеевых соединений для АЭТС с ВТГР 48

Реакторные испытания и послереакторные исследования углеродных материалов для АЭТС 51

Испытания и исследования ядерного топлива для ядерных реакторов различного типа: Определение выхода инертных газов из облученных таблеток UO2 и МОКС 52

Вторично-ионный масс-спектрометрический контроль концентрации лантаноида в составе бор-натрий-цинковой стекломатрицы 54

Результаты послереакторных исследований канала СУЗ РБМК-1000 после 40 лет эксплуатации, выполненные в 2025 году 57

Влияние наводороживания на структурно-фазовое состояние сплава Zr-2.5Nb 58

Нейтронографические исследования продуктов оксидного осаждения ДМ и РЗМ из хлоридных расплавов 62

Разработка установки компактирования продуктов ВТО СНУП ОЯТ для работы в горячей радиационно-защитной камере 65

Влияние скорости охлаждения на формирование структурно-текстурных состояний нержавеющей стали ферритно-мартенситного класса с 12 мас. % хрома 66

Испытания топлива ВТГР в номинальных и аварийных режимах 68

Расчет накопления изотопов тербия и гадолиния при облучении мишени, обогащённой по изотопу 160Gd 70

ДОСТИЖЕНИЯ 75

Прочие научно-технические достижения 88

Участие в федеральных и отраслевых программах, получение грантов и других форм поддержки 88

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ 90

Мероприятия, реализуемые АО «ИРМ» в рамках работы по развитию кадрового потенциала 94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 96

ПРЕДИСЛОВИЕ



В 2025 году на базе Института реакторных материалов получены значимые для отрасли результаты, сформированы важные заделы для дальнейшего долгосрочного развития института и научного дивизиона Госкорпорации «Росатом» в целом.

Как и прежде, институт активно участвует в решении отраслевых научно-технических задач. Так, на базе ИРМ регулярно проводятся послереакторные исследования элементов активных зон уран-графитовых канальных реакторов (РБМК-1000) на завершающем этапе эксплуатации, а также быстрого натриевого реактора (БН-600), которые позволят Концерну «Росэнергоатом» обосновывать и обеспечить безопасную эксплуатацию энергоблоков АЭС, увеличить ресурс элементов активных зон (твэлы, поглощающие элементы и др.) и, как следствие, повысить эффективность эксплуатации энергоблоков в целом.

В 2025 году продолжались работы по обоснованию материалов реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200. С использованием петлевой установки проведены эксперименты по исследованию влияния реакторного облучения на коррозионное поведение конструкционных сталей в свинце, содержащем кислород.

В рамках работ по созданию высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) в прошедшем году на стенде РИСК исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М проведены исследования топлива (микротвэлы и топливные компакты), изготовленного по оптимизированной лабораторной технологии. Достигнуты представительные значения глубины выгорания топлива (10-12% т.а.), а также проведён уникальный эксперимент с перегревом топливных компактов до аварийных температур и онлайн измерением выхода газообразных продуктов деления.

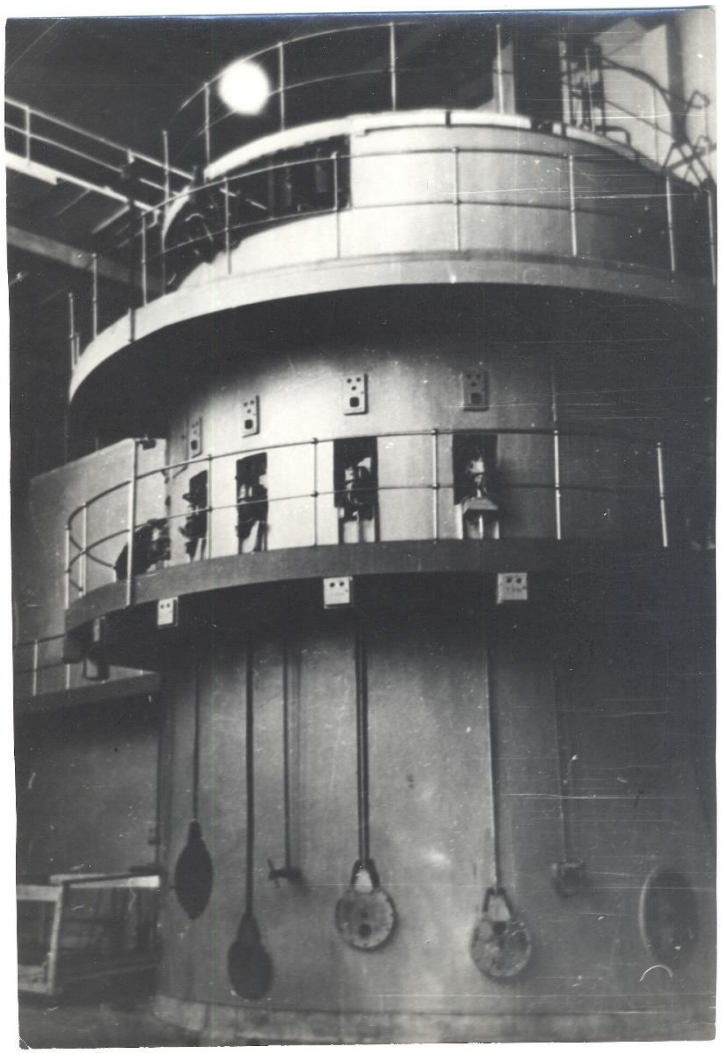
В рамках Единого Отраслевого Тематического Плана (ЕОТП) НИОКР Госкорпорации «Росатом», выполнены работы по двум проектам. Первый направлен на разработку методик и устройств для испытаний различных видов ядерного топлива, второй – на разработку технологии получения трихлорида тербия-161, изотопа для лечения рака.

С гордостью отмечу, что многими новыми направлениями в институте занимаются молодые ученые и инженеры, которые всего несколько лет назад выпустились из вузов, а сегодня демонстрируют высокие результаты

Е.Н. Селезнев

ОБ ИНСТИТУТЕ

История АО «ИРМ»



История создания ИВВ-2

Сооружение и ввод в эксплуатацию в апреле 1966 г. первого в регионе исследовательского ядерного реактора открыло новую страницу в научной истории Урала, поскольку уральская наука получила уникальный физический инструмент для фундаментальных исследований, а быстроразвивающаяся ядерная и транспортная энергетика – механизм научного сопровождения в части обоснования безопасности и надежности активных зон АЭС. На стадии завершения в СССР атомного проекта руководство страны, Госкомитета по науке и технике, Министерство среднего машиностроения СССР (МСМ СССР) и Академия наук СССР приняли стратегически важное решение о необходимости строительства в стране серии исследовательских атомных реакторов (ИЯР). В 1957 г. вышло постановление Совета министров СССР о сооружении серии ИЯР в ведущих центрах Союза (Ленинград, Минск, Рига, Тбилиси, Алма-Ата, Ташкент, Киев, Обнинск) и в ведущих вузах страны, отвечающих за кадровую подготовку ядерной отрасли, куда вошли физико-технические факультеты (ФТФ) УПИ, ТПИ и МИФИ, на базе атомных реакторов типа ИРТ и ВВР. В 1961 г. администрацией института, по согласованию с руководством области, было решено разместить ИРТ-1000. Но последующие принятые решения привели к изменению проекта ИРТ-1000 на ИВВ-2. Проектирование реактора ИВВ-2 было поручено Научно-исследовательскому и конструкторскому институту энерготехники (НИКИЭТ). 30 августа 1962 г. Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР был издан приказ № 0183с о строительстве реактора ИВВ-2.

К концу 1962 г. местом размещения реакторной установки был выбран поселок Заречный (вблизи промышленной площадки, строящейся Белоярской АЭС), благодаря имеющейся инженерной инфраструктуре и мощной специализированной строительной организации. По завершении строительства первой очереди комплекса ИВВ-2 объект был передан в Главное управление

ядерно-энергетических установок (ГУ ЯЭУ) МСМ СССР. В 1963 г. был создан экспериментально-исследовательский атомный центр.

Директором филиала предприятия п/я 788 (Комплекса ИВВ-2) назначен **М.А.Борисов** и 04.03.1966г. филиалу предприятия было присвоено открытое наименование **Свердловский физико-технический институт.**

В период пуско-наладочных работ были созданы службы электриков, СУЗ, КИП, дозиметрического контроля. В начале апреля 1966 г. подготовка к физическому пуску была завершена. Приказом директора предприятия №3с от 08.04.1966 г. был утвержден Акт готовности к проведению физического пуска. 18 апреля 1966 г. ГУ ЯЭУ МСМ СССР разрешило физический пуск реактора, который был успешно проведен эксплуатационным персоналом реактора ИВВ-2: **23 апреля 1966 г. В. К. Малышевым в оперативном журнале сделана запись в 12 ч 48 мин — «Критмасса!!!», что стало началом отсчёта истории института.**

Работы проводились в соответствии с утвержденной ГУ ЯЭУ МСМ СССР комплексной «Программой пуска реактора ИВВ-2» и «Методикой физического пуска и физических экспериментов на критсборке реактора ИВВ-2». Работы по программе физического пуска продолжались по 15 июля. После физического пуска реактора ИВВ-2 начались работы по освоению реактора, проверке режимов его работы, более рациональной компоновке активной зоны и созданию ловушек нейтронов, подготовка к выходу на проектную мощность 5 МВт к 1968 г.

В 1966 г. из комплекса зданий и лабораторных корпусов были введены в строй реакторный корпус и корпус механического цеха. А для работ с активными материалами в 1966-1967 гг. были подготовлены в реакторном корпусе временные лабораторные помещения с местной радиационной защитой.

В сентябре 1966 г. был утвержден первый состав научно-технического совета (НТС), куда вошли М.А. Борисов, В.И. Зеленов, В.В. Клюшин, Ю.А. Рычков, С.Г. Карпечко, В.К. Малышев, В.А. Кильдюшевский, Ю.П. Юмашев, В.Е. Моисеев, М.Г. Головачев и др. От НИКИЭТа в состав первого НТС вошел И.А. Стенбок. В составе НТС широко был представлен спектр уральской фундаментальной, прикладной и вузовской науки, в том числе: С.К. Сидоров, Б.Н. Гощицкий, А.К. Кикоин (ИФМ АН СССР); В.Г. Чухланцев (УПИ); Н.Д. Гутин (Уралгеология); В.Н. Микшевич (Горный институт); А.К. Матевосян (Институт химии УрО АН СССР); П.И. Поташев (Институт «Уралниипромедь»).

Проект исследовательского водо-водяного реактора бассейнового типа ИВВ-2, предназначенного для решения широкого спектра задач радиационного материаловедения, физики твердого тела, а также нейтронно-активационного анализа материалов, был разработан сотрудниками НИКИЭТ как оригинальная модернизированная конструкция типового исследовательского реактора ИРТ-2000 середины прошлого века. Большой вклад в эти разработки внес **В.И.Зеленов - первый главный инженер и директор института.**

Для ИВВ-2 была разработана концепция бассейнового реактора с многоловушечной активной зоной, набираемой из 6 секций в составе 6 ТВС и внутренней ловушкой нейтронов, окруженных по периферии бериллиевыми блоками и формирующих центральную ловушку. Экспериментальные устройства могли устанавливаться в центральную и боковые ловушки, а также замещать блоки

отражателя. Впервые в мировой практике бассейнового реакторостроения была реализована идеология формирования секционированных активных зон. Эта многоловушечная система остается востребованной и в настоящее время.

В 70-е годы предприятие значительно увеличило производственные мощности и экспериментально-стендовую базу исследовательского реактора, позволяющие решать самые серьезные задачи атомной энергетики. Подход к созданию замкнутого цикла исследований «реакторные – послереакторные» предопределил стратегию и направление усилий коллектива к сооружению "горячего" корпуса, ввод которого был осуществлен в **декабре 1973 г.**

В 1974-1976 гг. под непосредственным руководством Зеленова В.И., с сокращением плановых сроков, 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 режим работы с пробным выводом 20 МВт. Уникальная конструкция реактора ИВВ-2М позволила проводить исследования и испытания экспериментальных устройств различных направлений, что инициировало формирование научных направлений, многие из которых получили всесоюзное и международное признание.

С 2012 г. на реакторе ИВВ-2М проводится модернизация систем и оборудования. Были осуществлены реконструкция шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок, в соответствии с требованиями правил, и ремонтно-восстановительные работы на оборудовании и трубопроводах системы технического водоснабжения (второй контур реактора) с заменой основного оборудования и арматуры в соответствии с действующими требованиями правил. Главным конструктором АО «НИКИЭТ» проведены расчеты на прочность элементов бака реактора и внутрибаковых устройств ИЯУ ИВВ-2М.

В 2018 г. введена в эксплуатацию модернизированная система управления и защиты (СУЗ) с полной заменой аппаратуры СУЗ, введен в эксплуатацию модернизированный резервный пункт управления реактором. В июле 2018 г. завершен второй этап реконструкции исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М и получено разрешение на пуск.

В июне 2024 было подписано решение о продление срока эксплуатации объекта использования атомной энергии - исследовательской ядерной установки ИВВ-2М АО "ИРМ" до 2040 года.

Основные направления научных исследований и роль института в научном сообществе АО «Росатом Наука»

В акционерном обществе «Институт реакторных материалов» научно-техническая деятельность сосредоточена, в основном, в следующих направлениях:

- реакторные испытания, моделирующие реальные режимы эксплуатации материалов атомной энергетики, включая разработку и использование высокотехнологичных реакторных технологий;
- исследования материалов атомной энергетики, изучение влияния облучения на их служебные характеристики;
- производство радиоизотопной продукции медицинского, производственного и научного назначения (в т.ч. разработка новых радиационных технологий);
- модернизация научной и экспериментальной базы для расширения экспериментальных возможностей и повышения качества исследований.

Институт участвует в реализации исследований в рамках национального проекта «Новые атомные и энергетические технологии», Единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом», программ Концерна «Росэнергоатом» и других исследовательских программ, направленных на решение ключевых проблем развития атомной энергетики.

В 2025 году выполнены конкретные работы по направлениям:

- Коррозионные реакторные испытания образцов основного металла и сварных соединений аустенитной стали ЭП302-Ш в свинцовом теплоносителе при температуре 570°С.
- Послереакторные исследования образцов аустенитной стали ЭП302-Ш после реакторных петлевых испытаний (толщина, состав оксидных плёнок, изменения наноструктуры стали).
- Разработка моделей коррозии сталей в ТЖМТ, расчетные исследования кинетики образования оксидных пленок на стали ЭП-823 в свинцовом теплоносителе в статическом режиме.
- исследования канала СУЗ Смоленской АЭС после длительной эксплуатации;
- Реакторные испытания микротвэлов и топливных компактов ВТГР, изготовленных по усовершенствованной технологии, при номинальных и аварийных температурах;
- Реакторные испытания и послереакторные исследования углеродных материалов для АЭТС с ВТГР;
- Проведены расчётно-теоретические исследования для создания устройств и **методик, предназначенных для внутриреакторного оперативного контроля** плотности возмущённого потока тепловых нейтронов, выхода легколетучих продуктов деления из перспективных топливных материалов, а также послереакторного определения их глубины выгорания.

Перспективные направления исследований

Перспективы исследовательской деятельности АО «ИРМ» связаны с перечисленными ниже направлениями.

Обоснование безопасной и эффективной эксплуатации материалов и элементов активных зон действующих энергоблоков АЭС

В рамках данного направления ведутся исследования:

- технологических каналов и каналов СУЗ реакторов РБМК-1000 на завершающем этапе эксплуатации;
- элементов активных зон реакторов БН-600/800 (твэлы, пэлы, пусковые источники нейтронов).

Исследования топлива, материалов и элементов технологий двухкомпонентной атомной энергетики

В рамках данного направления проводятся исследования:

- уран-плутониевого топлива под облучением (образование и выход ГПД, изменение структуры и свойств);
- перспективных конструкционных материалов реакторов на быстрых нейтронах с натриевым и свинцовым теплоносителем (обоснование их радиационной и коррозионный стойкости в диапазоне рабочих температур);
- отработка элементов технологий переработки отработавшего уран-плутониевого топлива.

Испытания топлива и материалов перспективных ядерных установок

Здесь имеются в виду исследования:

- топлива и конструкционных материалов высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов;
- конструкционных и функциональных материалов термоядерных установок;
- топлива и конструкционных материалов, предназначенных для использования в малых ядерных установках (АСММ).

Разработка и внедрение новых технологий для получения радиоизотопных продуктов

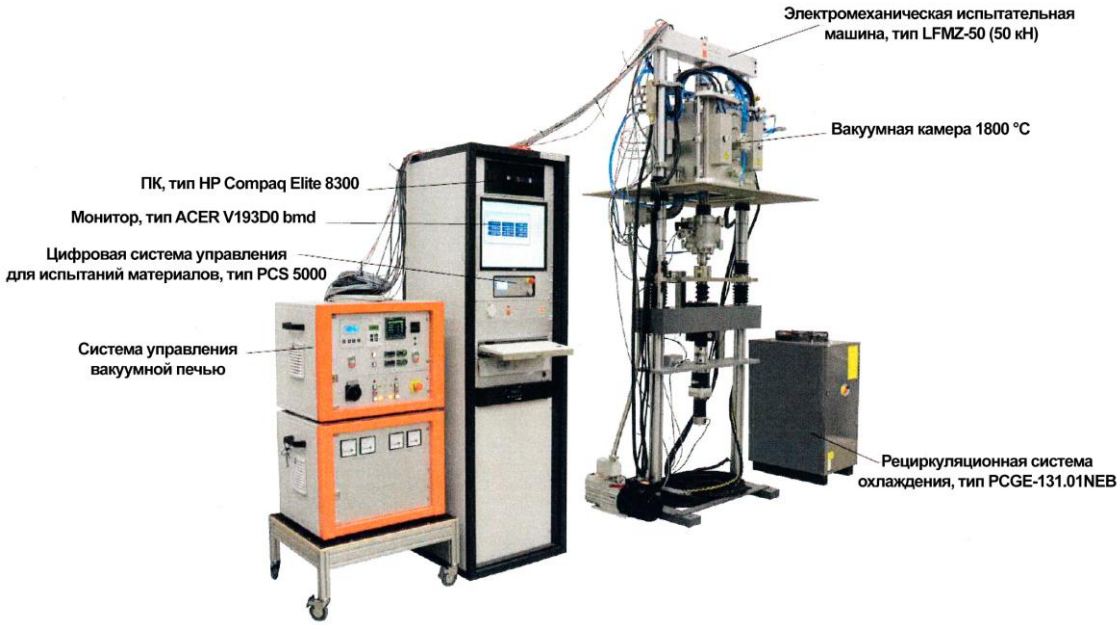
Исследования в области оптимальной реакторной наработки радиоизотопов, эффективного выделения целевых радионуклидов из облучённых мишеней и получения/изготовления конечного продукта – радиационного источника или, к примеру, вещества, меченного радиоактивным изотопом.

Обновление экспериментальной базы

В 2025 году было поставлено и введено в эксплуатацию оборудование, обеспечивающее проведение исследование механических свойств материалов в условиях ионизирующего излучения, а также проведены работы по модернизации экспериментальной базы реактора ИВВ-2М.

Разрывная машина LFMZ-50 в КГ-4

В 2025 году электромеханическая разрывная машина LFMZ-50 (Машина) установлена в радиационно-защитную камеру № 4 корпуса защитных камер. Машина предназначена для проведения кратковременных механических испытаний (растяжение, сжатие, изгиб), циклические испытания, испытаний на длительную прочность и ползучесть. Машина оснащена вакуумной камерой, при этом измерительные датчики машины (электродвигатель, силоизмерительный датчик и датчик перемещения, датчик вакуума) и управляющее оборудование (включая насосы и систему охлаждения) вынесены в подкамерное и лабораторное помещения с целью защиты их от воздействия ионизирующего излучения, возникающего от исследуемых облученных образцов. Непосредственно в помещении самой "горячей" камеры размещается только вакуумная камера с электропечью и захватами.



Технические характеристики:

- размеры Ш х Г х В: 1200 х 920 х 2928 мм;
- вес: 1500 кг;
- диапазон измеряемых нагрузок: от 0,25 кН до 50 кН;
- диапазон измерений перемещения подвижной траверсы: ± 50 (100) мм;
- предел допускаемой относительной погрешности силоизмерителя: ± 0,5 %;
- предел допускаемой относительной погрешности измерения перемещения
- подвижной траверсы: ± 1 %;

- предел допускаемой относительной погрешности задания скорости перемещения подвижной траверсы без нагрузки: ± 1 %;
- частота: от 49 Гц до 51 Гц;
- глубина вакуума: 10-6 мБар;
- максимальная температура нагрева: ± 1800 °С;
- скорость приложения нагрузки: от 0,00001 мм/мин до 70 мм/мин.

Электропечь позволяет проводить испытания образцов от плюс 100 °С до 1700 °С (среда – вакуум). Открытие и закрытие камеры электропечи производится с помощью электродвигателя. Удаление воздуха из камеры обеспечивается вакуумным роторным насосом производительностью 10 м3/ч и турбомолекулярным насосом производительностью 200 л/с. Натекание воздуха в камеру - менее 10^{-8} МБар*л/с.

Машина LFMZ-50 внесена в Государственный реестр средств измерений под № 22711-12, а электропечь аттестуется согласно процедуре, регламентированной ГОСТ Р 8.568-2017.

Модернизация реакторного стенда «РИСК» и реакторного стенда «УРАЛ»

На этапе обоснования безопасности топливных и конструкционных материалов перспективных реакторных установок особую роль занимают реакторные испытания данных материалов в условиях, приближенных к условиям проектируемых реакторных установок. В АО «Институт реакторных материалов» реализация методик реакторных испытаний топливных материалов проводится на базе реакторного стенда «РИСК», конструкционных материалов – на базе реакторного стенда «УРАЛ». В 2025 году начались масштабные работы по модернизации оборудования и систем данных стендов.

Реакторный стенд «РИСК» предназначен для проведения реакторных испытаний перспективных топливных материалов в газовой среде в широком диапазоне температур с целью исследования кинетики выхода газообразных продуктов деления (ГПД) из объектов испытаний в процессе облучения. Основные задачи реакторного стенда «РИСК» заключаются в поддержании инертной высокочистой газовой среды облучения объектов испытаний (He, Ne чистоты 6.0), индивидуальном вентилировании ампул с объектами испытаний, поддержании и оперативном изменении температурного режима облучения объектов испытаний, измерении выхода изотопов криптона (Kr-85m, -87 -88, -89) и ксенона (Xe-133, -135, -135m, -137, -138) из объектов испытаний в режиме online.

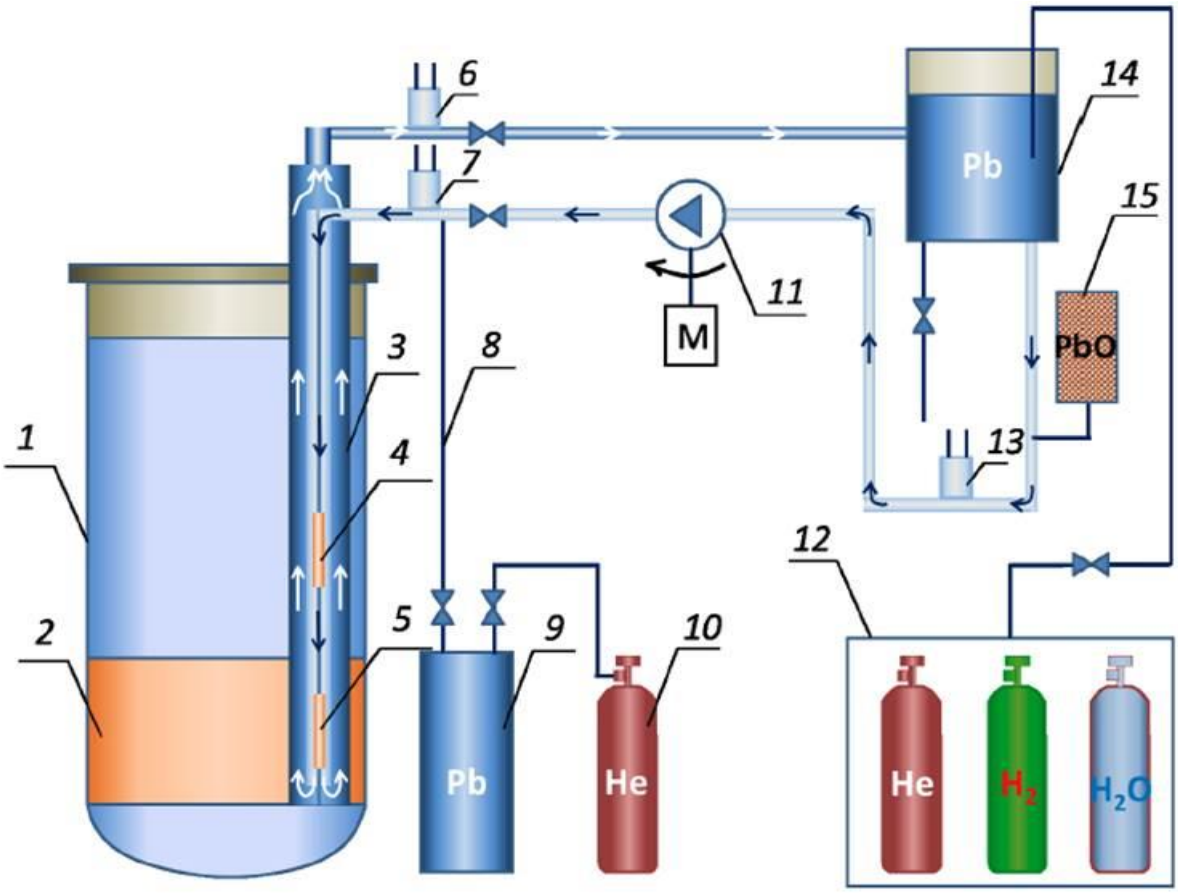
В рамках масштабной модернизации оборудования и систем реакторного стенда «РИСК», начатой в 2025 году, планируется кратно увеличить экспериментальные возможности стенда, а именно обеспечить:

- возможность индивидуального контроля чистоты газа в газовых линиях с помощью хроматографической системы;
- количество основных газовых линий не менее 32 шт. для индивидуального вентилирования не менее 16 ампул экспериментальных устройств;
- резерв газовых линий в количестве не менее 16 шт. для оперативного переключения ампул между газовыми линиями на останове реактора;

- поддержание и оперативное изменение (в среднем 7-10 ˚С/мин) температурного режима облучения объектов испытаний в диапазоне 1100-1800 ˚С;
- замену газа в рабочих полостях (He, Ne) и страховочных полостях (He, Ne, Ar);
- измерение выхода изотопов криптона (Kr-85m, -87 -88, -89) и ксенона (Xe-133,-135,-135m, -137,-138) из объектов испытаний в режиме online с помощью двух измерительных участков;
- отображение в режиме реального времени и запись с архивацией параметров испытаний с не менее чем с 48 термопреобразователей, 65 преобразователя давления, 2 расходомеров, 11 датчиков мощности дозы гамма излучения;
- количество измерительных каналов не менее 24 шт. для оперативного переключения термопреобразователей между измерительными каналами на останове реактора;
- дистанционное управление не менее чем 14 регуляторами расхода газа, 217 электромагнитными клапанами;
- дистанционное управление оборудованием и электромеханической запорной арматурой, а также дистанционный контроль всех технологических параметров с одного пульта управления, реализованные на базе SCADA-системы;
- индивидуальный контроль давления в газовых полостях ампул с помощью преобразователей давления в режиме реального времени с автоматической записью и архивацией.

Развитие методик проведения испытаний конструкционных материалов в исследовательском реакторе ИВВ-2М осуществляется на базе стенда «УРАЛ», имеющего единую систему технологического обеспечения экспериментов (энергопитание, подготовка и подача рабочих сред в экспериментальные устройства) и общую систему регистрации и сбора данных. Экспериментальные каналы и установки размещаются в активной зоне реактора ИВВ-2М, имеющей периферийные полости диаметром 60 мм и центральные полости ТВС диаметром 29 мм, обеспечивающие невозмущенный поток нейтронов до $2 \cdot 10^{14}$ нейтр./см^2·с (E>0,1 МэВ) и длительность испытаний до 7000 часов в год. Данная технологическая система позволяет контролировать и обслуживать (обеспечивать контроль и регулировку температурных режимов, поддерживать требуемый уровень вакуума или состав газовых смесей в рабочей и теплорегулирующей полостях) до 5 экспериментальных каналов.

Передовыми испытаниями, проводимыми на экспериментальной стендовой базе «УРАЛ», являются механические испытания образцов конструкционных материалов в условиях реакторного облучения, которые осуществляются на экспериментальной установке «Урал-Ползучесть», а также исследования влияния нейтронного облучения на коррозионную стойкость конструкционных материалов в среде жидкометаллического теплоносителя, осуществляемые на экспериментальной установке «Урал-Коррозия».



1 – корпус исследовательского реактора ИВВ-2М, 2 – активная зона реактора, 3 – экспериментальная установка, 4 – образцы стали вне зоны облучения, 5 – образцы стали под облучением (в активной зоне), 6 – датчик активности кислорода (ДАК) на выходе из установки, 7 – ДАК на входе в установку , 8 – капиллярная трубка, 9 - дренажный резервуар, 10 - газовый баллон, 11 – насос для перекачки жидкого свинца, 12 – система поддержания газовой среды, 13 – ДАК на выходе из массообменника, 14 – компенсатор свинца, 15 – массообменник (О2)

В 2025 году были начаты работ по модернизации экспериментальной стендовой базы «УРАЛ» и, в частности, экспериментальной установки «Урал-Коррозия», которые позволят применять новые методики исследований, увеличить качество проведения экспериментов и повысить предельно допустимые параметры испытаний.

Модернизация стендовой базы «УРАЛ» позволит обслуживать 5 экспериментальных каналов, используя следующие возможности:

- прецизионная регулировка состава и содержания газовых смесей в рабочей и теплорегулирующей полостях устройства, обеспечиваемая регуляторами расхода газа с высокой точностью измерения;
- удаленное управление сбросом газовых смесей из устройств, обеспечиваемое применением электромагнитных клапанов, позволяющее мгновенно заполнить канал инертным газом в случае аварийной ситуации;
- циркуляция газовых смесей через устройства с целью нивелирования возможности образования застойных зон и «послойного» перемешивания газов;

- автоматическая регистрация и сбор данных всех параметров испытаний (температура, давление, скорость расхода газовой смеси и т.д.) с использованием SCADA-системы.

- Модернизация экспериментальной установки «Урал-Коррозия» позволит расширить спектр возможностей следующим образом:

- увеличение предельной температуры жидкометаллического теплоносителя для проведения испытаний в условиях аварийной эксплуатации;

- нейтрализация негативного влияния циклической заморозки жидкометаллического теплоносителя в связи с плановыми остановами реактора, благодаря возможности обеспечения увеличенной скорости теплоносителя при помощи нового электромагнитного насоса;

- измерение скорости расхода жидкометаллического теплоносителя экспериментальным методом за счет установки расходомера.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение показателей коррозии стали ЭП302-Ш после испытаний в свинце при 570 °С в течение 2700 и 5200 ч. Часть 1: Результаты неразрушающего денсиметрического метода

Основным материалом контура циркуляции свинца и корпуса реактора реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 выбрана аустенитная хромоникелевая сталь ЭП302-Ш. Обоснование коррозионной стойкости при выборе стали было основано на экспериментальных данных, полученных с использованием так называемого металлографического метода, основанного на измерении толщины оксидных пленок. Использование этого метода не позволяет учесть скол и эрозию оксидных пленок, а также растворение продуктов коррозии в свинце. Последнее сказывается на получении заниженных величин по толщине оксидной пленки и расчетных значений глубины коррозии металла и не позволяет определять вынос продуктов коррозии в расплав свинца, которые могут в конечном итоге приводить к образованию отложений на холодных частях тракта циркуляции свинца, таких как поверхности теплообменников. Определение более широкого набора показателей коррозии стали ЭП302-Ш, включая основной металл и сварные соединения, остается актуальным.

В работе денсиметрическим методом определены показатели коррозии образцов основного металла и материала сварных соединений стали ЭП302-Ш, после коррозионных испытаний в экспериментальном устройстве реакторной петлевой установки «Урал-коррозия» в течение 2700 и 5200 часов в потоке свинца, содержащего кислород, при 540±15 °С.

Материалы и методики исследований

Исследовались образцы размером 15х10, 30х10 и 40х10 мм, вырезанные электроискровым способом из механически шлифованного до шероховатости R_a=1,5 мкм листа шириной 32 мм и толщиной ~1,2 мм сварного соединения с поперечным сварным швом (рисунок 1). Заготовка листа была подготовлена из темплетов сварного соединения, изготовленного в АО ЦНИИТМАШ из стандартных пластин.

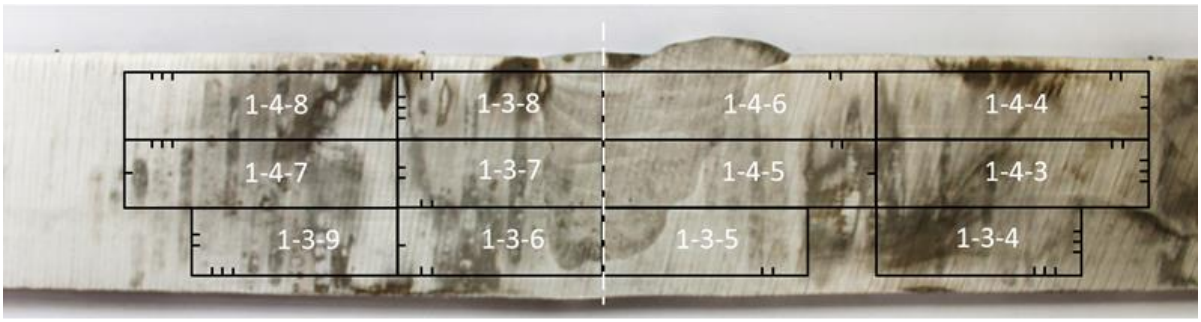


Рисунок 1 – Схема раскроя пластины на образцы

Рентгенофазовые исследования фазового состава продуктов коррозии и свинца на поверхности образцов стали ЭП320-Ш проводились на лабораторном рентгеновском дифрактометре D2 PHASER. Отделение инструментального фона и фазовый анализ выполнялись с использованием программы DIFFRAC.EVA. Качественный фазовый анализ проводился по базе данных PDF-2 2013 г.,

содержащей около 250 тыс. карточек. Количественный расчет доли кристаллических фаз проводился по программе TOPAS 4.2.

Определение массы и плотности образцов до и после коррозионных испытаний проводилось с использованием лабораторных аналитических весов SARTORIUS-MA-22 MSA 225 P-000-DI «SARTORIUS»5 и набора для определения плотности «SARTORIUS» YDK01.

Остатки свинца, остающиеся на поверхности образцов стали после коррозионных испытаний, удаляли путем химического травления в растворе, содержащем H_2O_2, CH_3COOH и C_2H_5OH в соотношении (1:1:1).

Определение показателей коррозии стали проводили в соответствии с разработанным в АО «ИРМ» неразрушающим способом, защищенным патентом РФ

№ 2794066 (RU), с использованием данных измерения массы m_0, m_1 и плотности ρ_{Me} и $\rho_{ср}$ образцов до и после коррозионных испытаний, а также плотности продуктов коррозии $\rho_{ок}$ по выражениям следующего вида:

- коррозионные потери металла

$$q_{i,3} = S_i^{-1}\left[m_{i,0} - \frac{m_{i,1}\cdot\rho_{Me}\cdot(\rho_{ок}-\rho_{ср})}{\rho_{ср}\cdot(\rho_{ок}-\rho_{Me})}\right], \quad (1)$$

- глубина проникновения равномерной коррозии

$$h_i = S_i^{-1}\cdot\rho_{Me}^{-1}\left[m_{i,0} - \frac{m_{i,1}\cdot\rho_{Me}\cdot(\rho_{ок}-\rho_{ср})}{\rho_{ср}\cdot(\rho_{ок}-\rho_{Me})}\right], \quad (2)$$

- толщина оксидной пленки

$$\delta_i = \frac{m_{i,1}\cdot(\rho_{Me}-\rho_{ср})}{S_i\cdot\rho_{ср}\cdot(\rho_{Me}-\rho_{ок})}, \quad (3)$$

- вынос продуктов окисления в коррозионную среду в пересчете на металл

$$W_i = S_i^{-1}\cdot\left\{m_{i,0} - \frac{m_{i,1}\cdot\left[\left(\rho_{ок} - \frac{n\cdot A_{Me}}{M}\rho_{Me}\right)\right] - \rho_{ср}\cdot\left(1-\frac{n\cdot A_{Me}}{M}\right)}{\rho_{ср}\cdot(\rho_{ок}-\rho_{Me})}\right\}, \quad (4)$$

где $m_{i,0}$ - масса образца до испытаний;

$m_{i,1}$ – масса образца после испытаний (с продуктами коррозии, но без свинца);

S_i - площадь поверхности образца;

n - число атомов металла в молекуле оксида;

A_{Me} - атомная масса металла;

M - молекулярная масса оксида.

При определении коррозионных характеристик по выражениям (1)-(4) требуется знание фазового состава продуктов коррозии, которые были получены с использованием рентгенофазового анализа.

Результаты исследований и их обсуждение

Рентгенофазовый анализ

Определен фазовый состав образца основного металла (ОМ) в исходном состоянии, ОМ и сварного шва (СШ) образца сварного соединения (СС) стали ЭП302-Ш после испытаний в течение 2700 ч.

Материал основного металла стали в исходном состоянии состоит на ~93 масс. % из аустенита и содержит до ~5,0 масс. % α-феррита и до ~2,0 масс. % карбонитрида ниобия Nb(C,N).

После коррозионных испытаний фазовый состав поверхностных слоев стали существенно меняется: происходит увеличение содержание доли α-феррита до ~76 асс. % в материале ОМ и до ~77 масс. % в материале сварного шва. Доля аустенита в материалах ОМ и СШ снижается до ~19,5 и ~19 масс. % соответственно. В нормированных значениях фазового состава металлической подложки отмечается повышенное (почти в два раза) содержание карбонитридов ниобия Nb(C,N). Это можно объяснить тем, что карбонитниды ниобия не окисляются и переходят в продукты коррозии в нетронутом (неоскидированном) состоянии, а разделить какая доля этой фазы находится в продуктах коррозии, а какая в металлической подложке не представляется возможным. Поэтому можно считать, что массовая доля карбонитридов ниобия в образце после испытаний не изменилась.

Можно сказать, что фазовый состав продуктов коррозии на материалах ОМ и СШ (в пределах погрешности определения) практически одинаков и состоит из фаз типа Fe_3O_4 на ~67-68 масс. %, хромита Cr_2O_3 - ~28-30 масс. %, оксида свинца ~2,1-2,4 масс. % и металлического свинца до ~1,0 масс. %.

Поскольку фазы Fe_3O_4 и $(Fe,Cr)_3O_4$ имеют одинаковые ГЦК кристаллографические решетки и близкие значения параметров кристаллических решеток, возможно наложение их дифракционных рефлексов, поэтому количественное разделение фаз Fe_3O_4 и $(Fe,Cr)_3O_4$ методом РФА не представляется возможным. Таким образом, определенная методом РФА фаза Fe_3O_4 может быть, как только фазой $(Fe,Cr)_3O_4$, так смесью фаз Fe_3O_4 и $(Fe,Cr)_3O_4$.

Результаты денсиметрических измерений

Результаты определения показателей коррозии материалов ОМ и СС, определенные методом денсиметрических измерений, приведены на рисунке 2. Согласно полученным данным, коррозионные потери металла $q_{ОМ}$ и средняя глубина коррозии $h_{ОМ}$ основного металла стали имеют меньшие значения по сравнению с аналогичными показателями $q_{СС}$ и $h_{СС}$ для образцов сварного соединения (рис. 2а), состоящими из материала основного металла и материала сварного шва СШ в соотношении площадей $S_{СШ} : S_{ОМ} = 1 : 3 \div 1 : 1$. При этом оба показателя обоих материалов нелинейно и ускоренно возрастают с увеличением длительности испытаний с 2700 до 5200 ч (рис.2а). Аналогичные заключения относятся к значениям глубины коррозии материалов, так как последние рассчитываются по данным определения коррозионных потерь.

Значения толщины оксидной пленки обоих материалов $\delta_{ОМ}$ и $\delta_{СС}$ практически линейно возрастают с увеличением длительности испытаний (рис. 2б). Выявлено, что после обеих экспозиций значения толщины оксидной пленки на образцах

сварного соединения имеют большие значения по сравнению с толщиной оксидной пленки на образцах из одного ОМ в среднем на ~12- 20 % (рис. 2б).

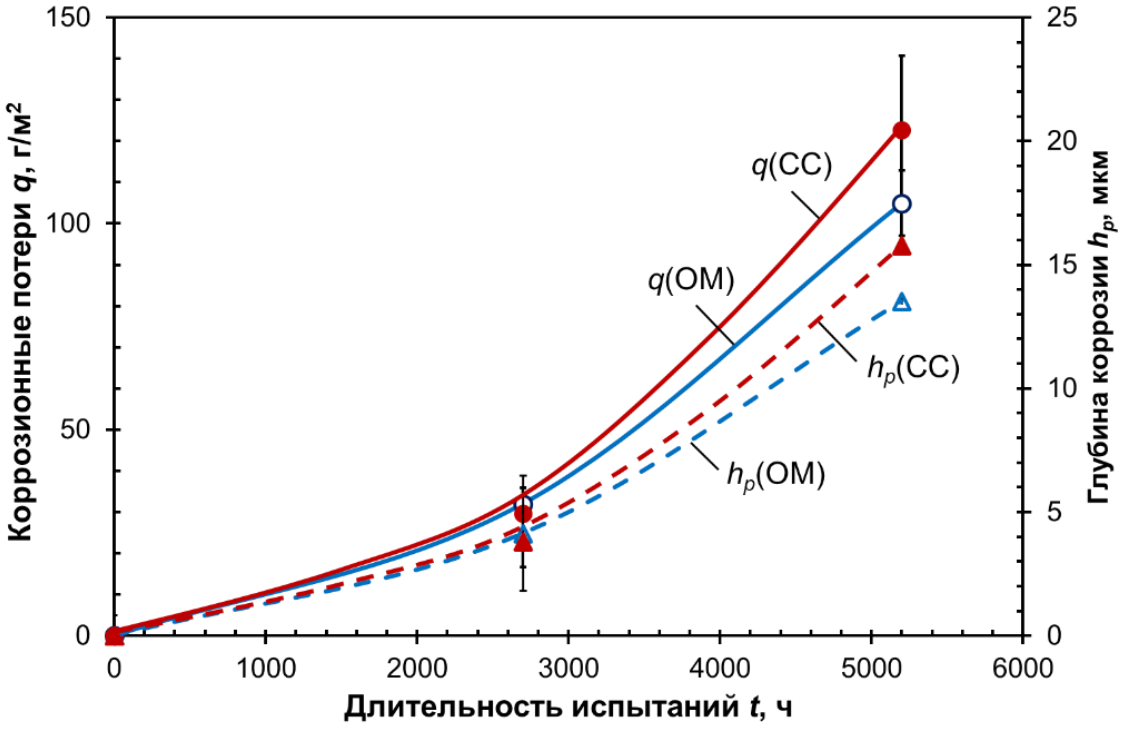
Зависимости изменения выноса продуктов коррозии *W* в абсолютных величинах для обоих материалов ОМ и СС нелинейно и ускоренно возрастают с увеличением длительности испытаний с 2700 до 5200 часов (рис. 2а,в). В то же самое время зависимость выноса ПК в процентах от коррозионных потерь для материала СС имеет практически линейную зависимость от времени $W_{СС}(\%)=1{,}28\cdot10^{-2}\cdot t$, а для материала основного металла зависимость выноса ПК в процентах от коррозионных потерь имеет параболическую зависимость $W_{ОМ}(\%)=0{,}936\cdot t^{0,5}$.

Выводы

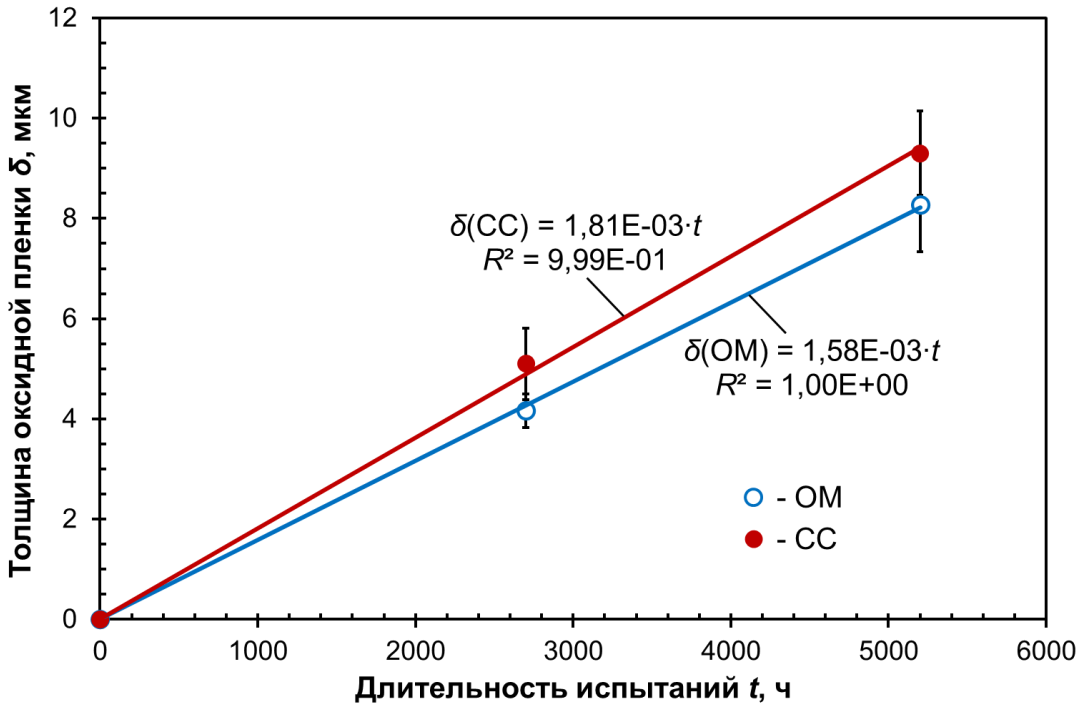
С использованием денсиметрического метода произведено определение средних значений показателей коррозии (коррозионных потерь металла, глубины коррозии, толщины оксидной пленки и выноса продуктов коррозии в Pb) материалов основного металла и сварных соединений аустенитной хромоникелевой стали ЭП302-Ш после коррозионных испытаний вне облучения при 540±15 °С длительностью 2700 и 5200 часов в потоке Pb с содержаниями кислорода $(0{,}8\text{-}1{,}8)\cdot10^{-6}$ и $\sim2{,}2\cdot10^{-6}$ масс. % соответственно.

Согласно полученным данным, материалы основного металла и сварных соединений стали ЭП302-Ш имеют удовлетворительную коррозионную стойкость в условиях проведенных экспериментов.

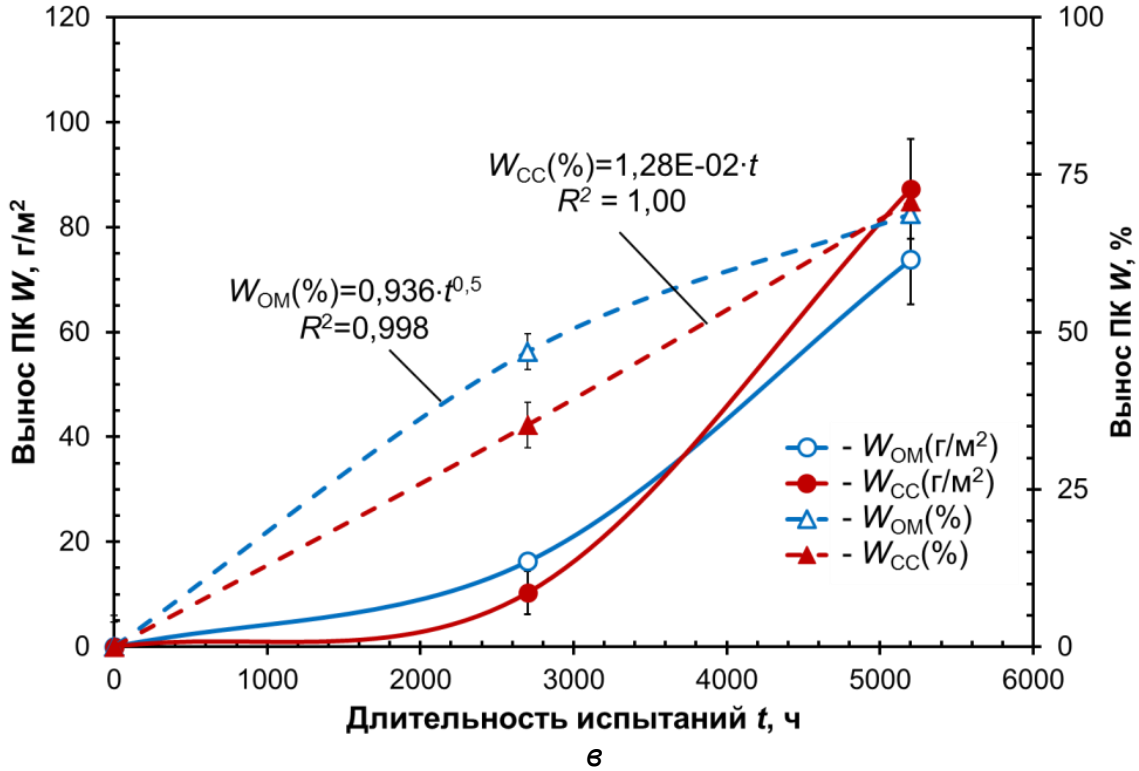
Выявлено, что материалы сварных соединений имеют значения всех показателей коррозии в среднем на ~10-20 % большие по сравнению с аналогичными показателями для основного металла стали ЭП302-Ш.



а - коррозионные потери



б - толщина оксидной пленки δ; вынос ПК W



в

Рисунок 2 – Влияние длительности испытаний на изменение показателей коррозии материалов ОМ и СС стали ЭП302-Ш в свинце при 540±15 °С с содержанием кислорода

О.А. Голосов, С.С. Хвостов, Ю.С. Романченко,Н.В. Глушкова, Е.В. Шабельников, Ярков В.Ю., Устинов А.Е., Чегодаева Л.Н. Шабельников Е.В., Ожгихин Д.А., Зырянова А.А., Литовченко В.Ю.

Определение показателей коррозии стали ЭП302-Ш после испытаний в свинце при 570 °С в течение 2700 и 5200 ч. Часть 2: Результаты определения гравиметрическим методом

Работа является продолжением определения показателей коррозии с использованием неразрушающего денсиметрического метода.

В настоящей части представлены результаты определения показателей коррозии образцов основного металла и материала сварных соединений стали ЭП302-Ш, полученных с использованием гравиметрического метода с полным удалением продуктов коррозии (ПК) с поверхности образцов стали после коррозионных испытаний при 540±15 °С в течение 2700 и 5200 часов в потоке свинца, содержащего кислород, в экспериментальном устройстве реакторной петлевой установки «Урал-коррозия».

Материалы и методики исследований

Исследования проводились на тех же образцах основного металла (ОМ) и материала сварных соединений (СС) стали ЭП302-Ш размером 15х10, 30х10 и 40х10 мм, которые были подвергнуты неразрушающим денсиметрическим измерениям. Образцы ОМ и СС стали ЭП302-Ш после денсиметрических измерений имели подготовку поверхности, необходимую в соответствии с патентом РФ № 2794066 (RU) и ГОСТ 9.908-85 (полное удаление остатков свинца с поверхности образцов и из ПК) для проведения гравиметрических исследований с полным удалением продуктов коррозии (ПК) с поверхности образцов. Удаление ПК проводили химическим способом поэтапно (до постоянства массы образцов) в соответствии с ГОСТ 9.907-2007 с использованием химических растворов, рекомендованных для коррозионностойких сталей. Для ускорения процесса травления ПК использовалась ультразвуковая ванна. После каждого этапа травления образцов производилась тщательная промывка образцов вначале проточной водопроводной водой, а затем дистиллированной водой, после этого производилась сушка образцов вначале полосканием в этиловом спирте с последующим обдувом воздуха и окончательной сушкой в сушильном шкафу при 105 °С в течение 10 минут. После охлаждения образцов до комнатной температуры определялась их масса с использованием лабораторных аналитических весов SARTORIUS-MA-22 MSA 225 P-000-DI «SARTORIUS»5.

На основании результатов измерения массы образцов до и после коррозионных испытаний, а также массы образцов после коррозионных испытаний и удаления продуктов коррозии с их поверхности определяли следующие характеристики коррозионной стойкости *i*-х образцов стали в соответствии с выражениями:

$$q_{i,1} = \frac{m_{i,1} - m_{i,0}}{S_i}, \quad (1)$$

$$q_{i,2} = \frac{m_{i,2} - m_{i,0}}{S_i}, \quad (2)$$

$$h_i = \frac{m_{i,0} - m_{i,2}}{S_i \cdot \rho_{\text{Me}}}, \quad (3)$$

$$\delta_{i=} \frac{m_{i,1} - m_{i,2}}{S_i \cdot \rho_{\text{ок}}}, \quad (4)$$

$$W_i = \frac{m_{i,0} - m_{i,2} - \alpha_{\text{Me}} \cdot (m_{i,1} - m_{i,2})}{S_i}, \quad (5)$$

где $q_{i,1}$ – изменение массы *i*-го образца, обусловленное коррозионными процессами;

$q_{i,2}$ – коррозионные потери металла *i*-го образца;

$m_{i,0}$ –масса *i*-го образца до испытаний;

$m_{i,1}$ – масса *i*-го образца после испытаний (с ПК, но без свинца);

$m_{i,2}$ – масса *i*-го образца после испытаний (без ПК и без свинца);

S_i – площадь поверхности *i*-го образца;

h_i – средняя глубина коррозии;

ρ_{Me} и $\rho_{\text{ок}}$ – плотности металла и оксидной пленки, соответственно;

$m_{i,0}$ – масса образца до экспозиции в Pb;

W_i – вынос продуктов коррозии в коррозионную среду (в пересчете на металл);

α_{Me} – доля металла в оксидной пленке.

Для определения коррозионных потерь металла по выражению (2) и глубины коррозии (3) не требуется знания фазового состава продуктов коррозии.

Для расчета толщины оксидной пленки и выноса ПК по выражениям (4) и (5) необходимо знание фазового состава ПК, образующихся на поверхности образцов, определение которого проводили методом рентгенофазового анализа.

Результаты гравиметрических измерений и их обсуждение

На рисунке 3 приведены характерные графические зависимости изменения массы образцов ОМ и СС в процессе проведения поэтапных операций химического удаления ПК с их поверхности по вышеописанным методикам.

На обоих графиках нанесены пунктирные линии, соответствующие массе образцов до испытаний m_{o} и массы металла m_{Me} в образцах.

Нанесенная на графики пунктирная линия m_{Me} является реперной. С одной стороны, она может выступать, как целевая величина достижения полноты удаления всей массы ПК с поверхности образцов. С другой стороны, она может выступать, как характеристика, либо наличия остатков практически не удаляемых ПК на основе химически стойких оксидов металлов типа Cr_2O_3 и SiO_2 в зернограничных «усах» в слое внутреннего окисления (в данном случае кривая травления должна быть выше линии m_{Me}), либо, наоборот, растворения остатков зерен металла охваченных зернограничным окислением (в данном случае кривая травления должна быть ниже линии m_{Me}).

Согласно данным, приведенным на рисунке 3, изменение массы обоих образцов происходит в два этапа, обозначенных римскими цифрами I и II.

На первой стадии I происходит удаление незащитного, пористого внешнего слоя оксидной пленки из магнетита Fe_3O_4.

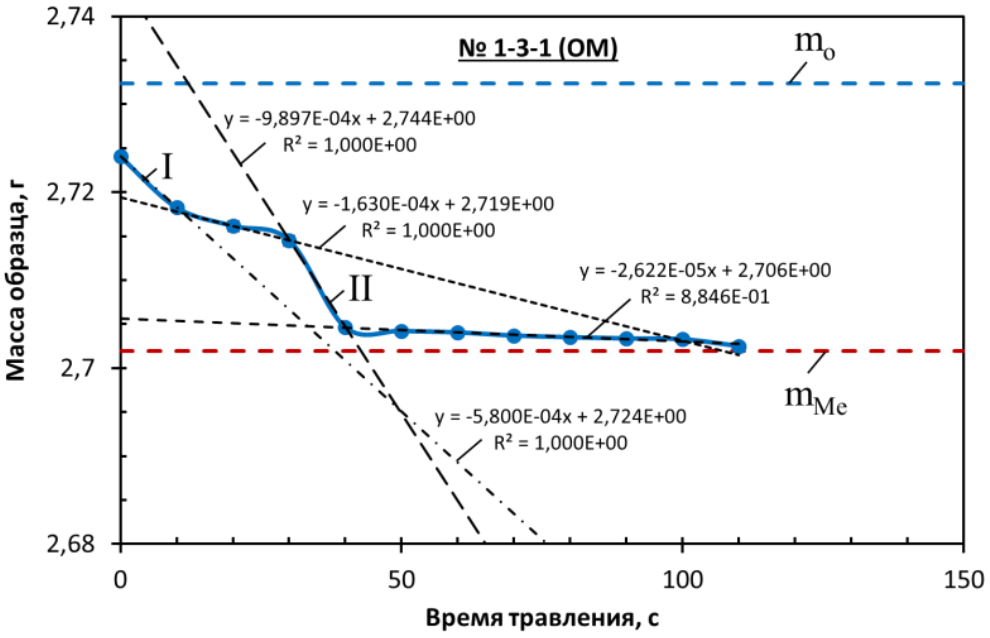
На второй стадии II происходит травление более плотного и защитного, внутреннего слоя оксидной пленки из железо-хромистой шпинели $(Fe,Cr)_3O_4$.

Анализ кривой травления образца ОМ свидетельствует, что стадия стабилизации изменения массы образца с № 3-1-1 располагается немного выше линии m_{Me} (рис.3а), что, в свою очередь, как отмечалось выше, может свидетельствовать о наличии (в небольших количествах) остатков стойких оксидов

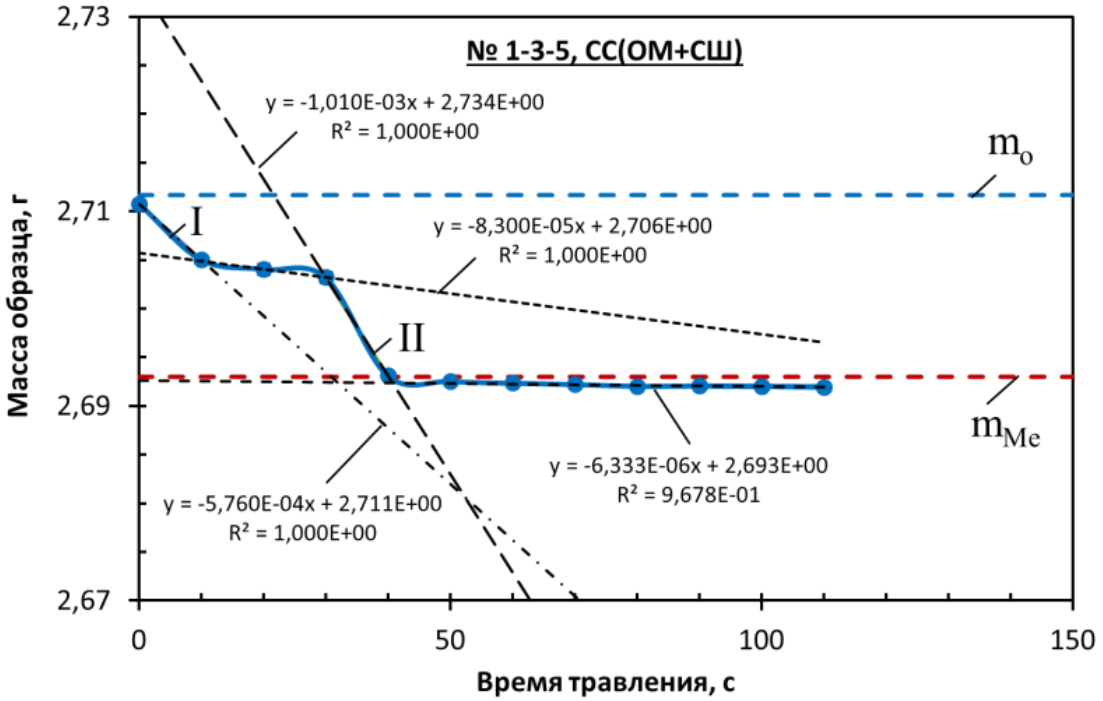
металлов типа Cr_2O_3 и SiO_2 на поверхности образца. Согласно данным РФА, наличие фазы Cr_2O_3 было выявлено в ПК образцов после коррозионных испытаний. Это косвенно подтверждается данными визуального осмотра поверхности образцов после удаления ПК с их поверхности (рис.4в). На снимках поверхности образца ОМ после удаления ПК отчетливо видны отдельные участки с более темным контрастом, на которых могут быть остатки фазы Cr_2O_3, проникшие по границам зерен вглубь металла (рис. 4в).

На графиках зависимостей $m=f(t)$ нанесены линии тренда, соответствующие каждой стадии травления ПК, с использованием выражений которых производилась оценка массы слоя магнетита $m(Fe_3O_4)$, слоя железо-хромистой шпинели $m((Fe,Cr)_3O_4)$, общей массы ПК $m_{ок}$ и оставшейся массы металла m_2 в образцах. Полученные в результате гравиметрических измерений значения m_0, m_1 m_2 использовались для расчета по выражениям (1)-(4) показателей коррозии стали. Результаты определения показателей коррозии материалов ОМ и СС, приведены на рисунке 5.

Согласно полученным данным, коррозионные потери металла $q_{ОМ}$, $q_{СС}$ и средние глубины коррозии $h_{ОМ}$, $h_{СС}$ материалов ОМ и СС нелинейно и ускоренно возрастают с увеличением длительности испытаний с 2700 до 5200 ч (рис.5а). При этом значения $q_{ОМ}$ и $h_{ОМ}$ ОМ стали после первой экспозиции 2700 ч имели почти на 60 % большие значения по сравнению с аналогичными показателями $q_{СС}$ и $h_{СС}$ для образцов сварного соединения (рис. 4а). Однако с увеличением длительности испытаний до 5200 ч картина изменилась и к концу 5200 ч испытаний уже значения $q_{СС}$ и $h_{СС}$ превышали почти на 30 % значения $q_{ОМ}$ и $h_{ОМ}$ (рис. 5а).

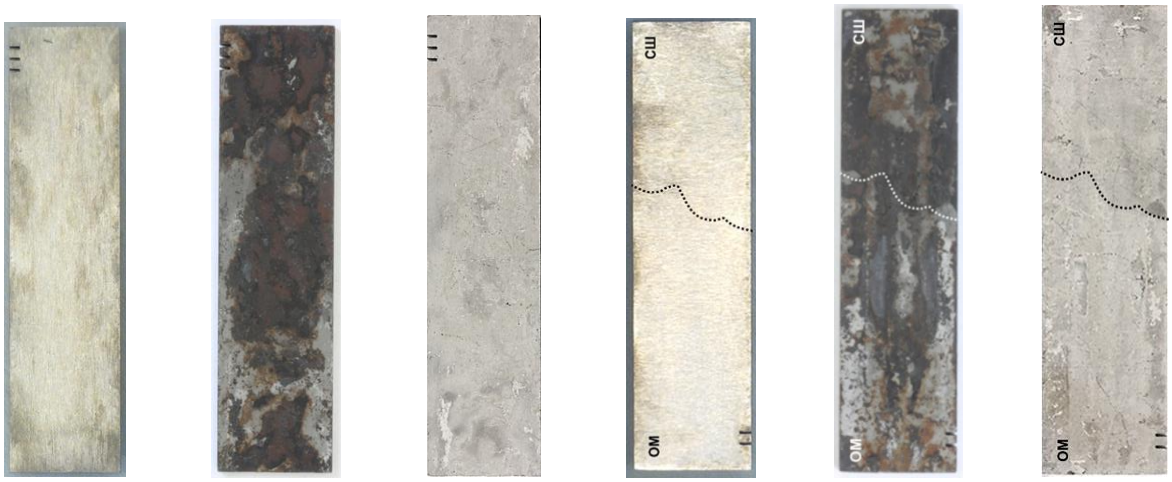


а - образец ОМ № 3-1-1



б - образец СС № 3-1-5

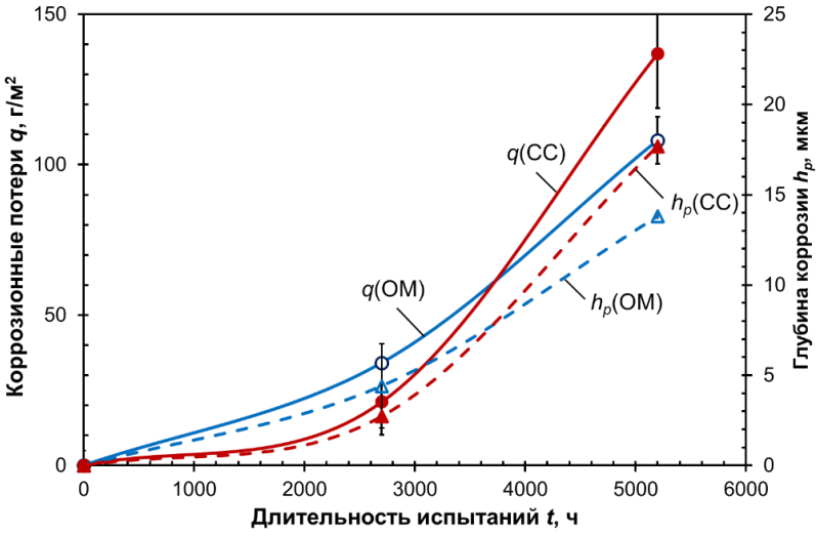
Рисунок 3 - Кинетические зависимости изменения массы образцов ОМ и СС в зависимости от времени травления при выполнении операций по удалению ПК



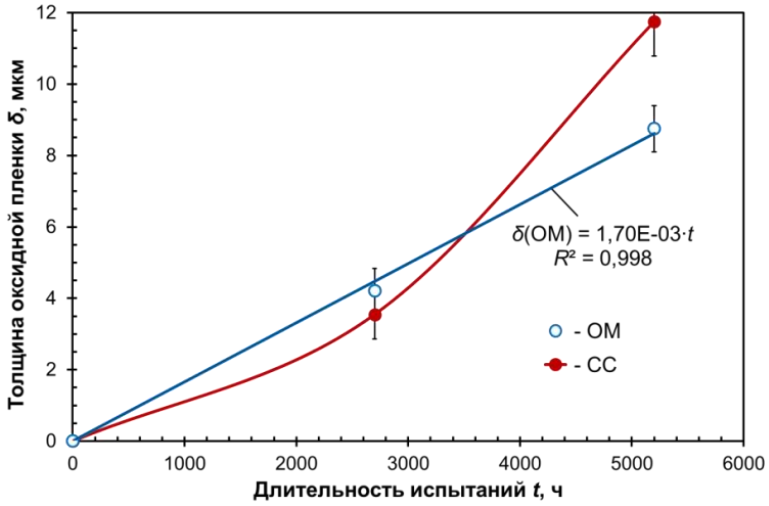
а *б* *в* *г* *д* *е*

а - в – образец ОМ; г – е – образец СС; а, г – до испытаний; б, д – после испытаний с ПК; в, е – после испытаний и удаления ПК

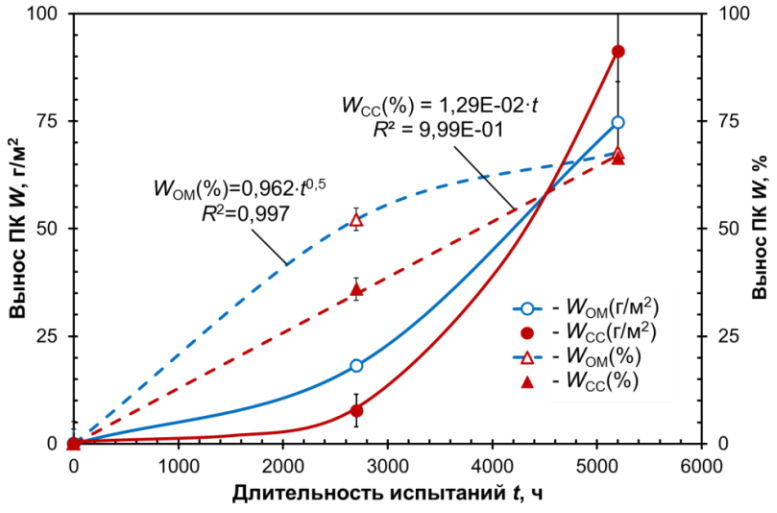
Рисунок 4 – Внешний вид образцов ОМ и СС до и после коррозионных испытаний



а



б



в

а – коррозионные потери q; б – толщина оксидной пленки δ; вынос ПК W

Рисунок 5 – Влияние длительности испытаний на изменение показателей коррозии материалов ОМ и СС стали ЭП302-Ш в свинце при 540±15 °С с содержанием кислорода

Значения толщины оксидной пленки обоих материалов $\delta_{ОМ}$ и $\delta_{СС}$ имеют различные зависимости (рис. 5б). Так значения толщины оксидной пленки на образцах ОМ практически линейно возрастают с увеличением длительности испытаний, в то время как толщина оксидной пленки на образцах сварных соединений имеет нелинейную зависимость (рис. 5б). При этом после 2700 ч испытаний толщины оксидной пленки обоих типов образцов имели практически сравнимые (в пределах погрешности измерения) значения, равные 4,2±0,7 и 3,6±0,6 мкм соответственно для образцов ОМ и СС. В то время как, после 5200 ч испытаний значения толщины оксидной пленки на образцах СС почти на 35 % превышали значения толщины оксидной пленки на образцах ОМ (рис. 5б).

Зависимости изменения выноса продуктов коррозии *W* в абсолютных величинах для обоих материалов ОМ и СС нелинейно и ускоренно возрастают с увеличением длительности испытаний с 2700 до 5200 часов (рис. 5а,в). В то же самое время зависимость выноса ПК в процентах от коррозионных потерь для материала СС имеет практически линейную зависимость от времени $W_{СС}(\%)=1{,}29\cdot10^{-2}\cdot t$, а для материала основного металла зависимость выноса ПК в процентах от коррозионных потерь имеет параболическую зависимость $W_{ОМ}(\%)=0{,}962\cdot t^{0,5}$.

Выводы

С использованием разрушающего гравиметрического метода произведено определение средних значений показателей коррозии (коррозионных потерь металла, глубины коррозии, толщины оксидной пленки и выноса продуктов коррозии в Pb) материалов основного металла и сварных соединений аустенитной хромоникелевой стали ЭП302-Ш после коррозионных испытаний вне облучения при 540±15 °С длительностью 2700 и 5200 часов в потоке свинца с содержаниями кислорода $(0{,}8\text{-}1{,}8)\cdot10^{-6}$ и ~$2{,}2\cdot10^{-6}$ масс. % соответственно. Значения показателей коррозии материалов основного металла и сварных соединений стали ЭП302-Ш, определенные гравиметрическим методом, имеют хорошую сходимость с данными, полученными с помощью денсиметрического метода

Показано, что материалы основного металла и сварных соединений стали ЭП302-Ш имеют удовлетворительную коррозионную стойкость в условиях проведенных экспериментов.

Выявлено, что значения всех показателей коррозии материала сварных соединений имеют в среднем на ~10-20 % большие по сравнению с аналогичными показателями для основного металла стали ЭП302-Ш.

О.А. Голосов, С.С. Хвостов, Ю.С. Романченко,
Н.В. Глушкова, Е.В. Шабельников

Определение показателей коррозии стали ЭП302-Ш после испытаний в свинце при 570 °С в течение 2700 и 5200 ч. Часть 3: Результаты определения геометрическим методом

Статья является продолжением цикла по определению показателей коррозии с использованием денсиметрического метода и гравиметрического метода с полным удаления продуктов коррозии. В настоящей части работ

представлены результаты определения показателей коррозии образцов основного металла и материала сварного шва сварных соединений стали ЭП302-Ш, полученных с использованием геометрического метода, после коррозионных испытаний при 540±15 °С в течение 2700 и 5200 часов в потоке свинца, содержащего кислород, в экспериментальном устройстве реакторной петлевой установки «Урал-коррозия».

Материалы и методики исследований

В работе исследовались образцы основного металла (ОМ) и сварных соединений (СС) стали ЭП302-Ш прямоугольной формы размером 10х5 мм, вырезанные из области соприкосновения материалов сварного шва (СШ) и основного металла, а также из участков ОМ, отстоящих от линии сплавления СШ и ОМ на расстояниях 5-15, 15-25 и 25-35 мм. Образцы стали были вырезаны электроискровым методом из пластины толщиной 1,2 мм в состоянии после механической шлифовки корундовыми кругами до шероховатости *Ra*=1,25 мм. Фотографии образцов СС и ОМ приведены на рисунке. 1а и 1в.

Измерение толщины образцов в исходном состоянии d_0 производилось методом прямых измерений с использованием цифровой измерительной головки MarCator серии MarCator 1086R, измерительной скобы и концевой плоскопараллельной меры длины толщиной 1,21 мм (в качестве контрольного образца).

Измерение толщины образцов после коррозионных испытаний d_1 производилось на металлографических шлифах, подготовленных стандартным способом, с использованием измерительного микроскопа Nikon MM-400 в тех же сечениях, что и до коррозионных испытаний. Одновременно с измерениями толщины образцов в этих же сечения с обеих сторон образцов производились изменения толщины слоя магнетита $\delta_{М,i}$, железо-хромистой шпинели $\delta_{Ш,i}$, общей толщины оксидной пленки $\delta_{ок,i}$, слоя внутреннего окисления $h_{ВО,i}$, глубины очагов жидкометаллической коррозии $h_{ЖМК,i}$. С использованием этих данных производился расчет средних значений $\overline{\delta_М}, \overline{\delta_Ш}, \overline{\delta_{ок}}, \overline{h_{ВО}}, \overline{h_{ЖМК}}, \overline{d_0}, \overline{d_1}$ с определением погрешности их определения, а также расчет следующих показателей коррозии по выражениям:

Средняя глубина равномерной коррозии по образцу в целом (в мм):

$$\bar{h} = \frac{\overline{d_0} - \overline{d_1}}{2}; \quad (1)$$

Коррозионные потери (в г/м^2)

$$\bar{q} = \frac{10^3 \cdot \rho_{Me} \cdot (\overline{d_0} - \overline{d_1})}{2}; \quad (2)$$

Вынос ПК в пересчете на металл (в г/м^2):

$$\overline{W} = 10^3 \left(\bar{h} - \frac{A_{Fe} \cdot n_{Fe} \cdot \rho_М \cdot \overline{\delta_М}}{M_М \cdot \rho_{Me}} - \frac{(A_{Fe} \cdot n_{Fe} + A_{Cr} \cdot n_{Cr}) \cdot \rho_Ш \cdot \overline{\delta_Ш}}{M_Ш \cdot \rho_{Me}} \right) \cdot \rho_{Me}; \quad (3)$$

Вынос ПК в пересчете на металл (в % от коррозионных потерь):

$$\overline{W} = \frac{100 \cdot \left(\bar{h} - \frac{A_{Fe} \cdot n_{Fe} \cdot \rho_М \cdot \overline{\delta_М}}{M_М \cdot \rho_{Me}} - \frac{(A_{Fe} \cdot n_{Fe} + A_{Cr} \cdot n_{Cr}) \cdot \rho_Ш \cdot \overline{\delta_Ш}}{M_Ш \cdot \rho_{Me}} \right)}{\bar{h}}; \quad (4)$$

где A_{Fe} и A_{Cr} - атомные массы Fe и Cr; n_{Fe} и n_{Cr} содержание атомов железа и хрома в молекулах магнетита Fe_3O_4 и железо-хромистой шпинели $(Fe,Cr)_3O_4$; ρ_{Me}, $\rho_М$, $\rho_Ш$ – плотности металла стали, магнетита и железо-хромистой шпинели,

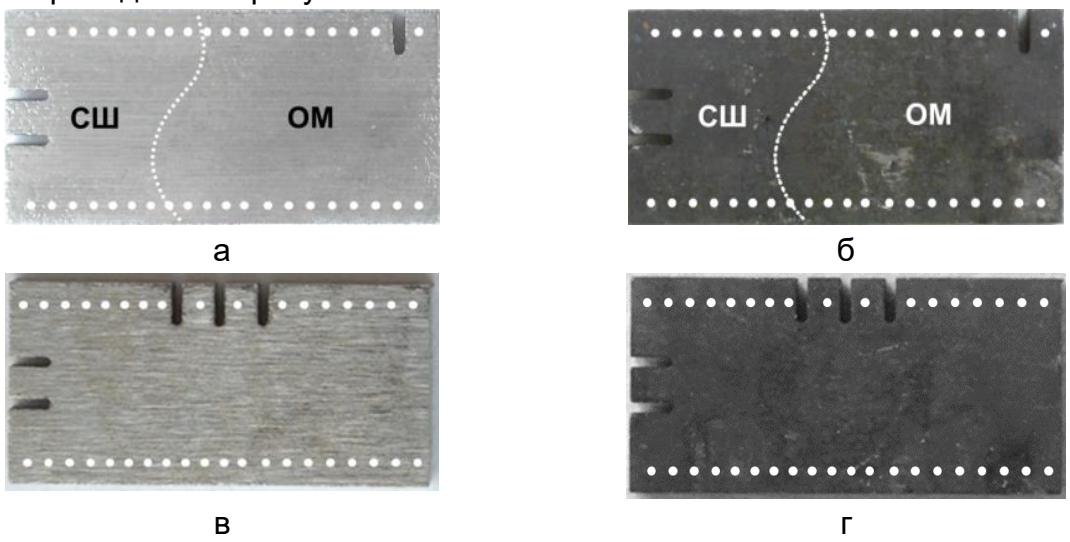
соответственно; $M_м$ и $M_ш$ – молекулярные массы магнетита и железо-хромистой шпинели соответственно.

Для определения глубины коррозии *h* коррозионных потерь металла *q* по выражениям (1) и (2) не требуется знания фазового состава продуктов коррозии.

Для расчета значений выноса ПК по выражениям (3) и (4) необходимо знание фазового состава ПК, образующихся на поверхности образцов, определение которого проводили методом рентгенофазового анализа.

Результаты геометрических измерений и их обсуждение

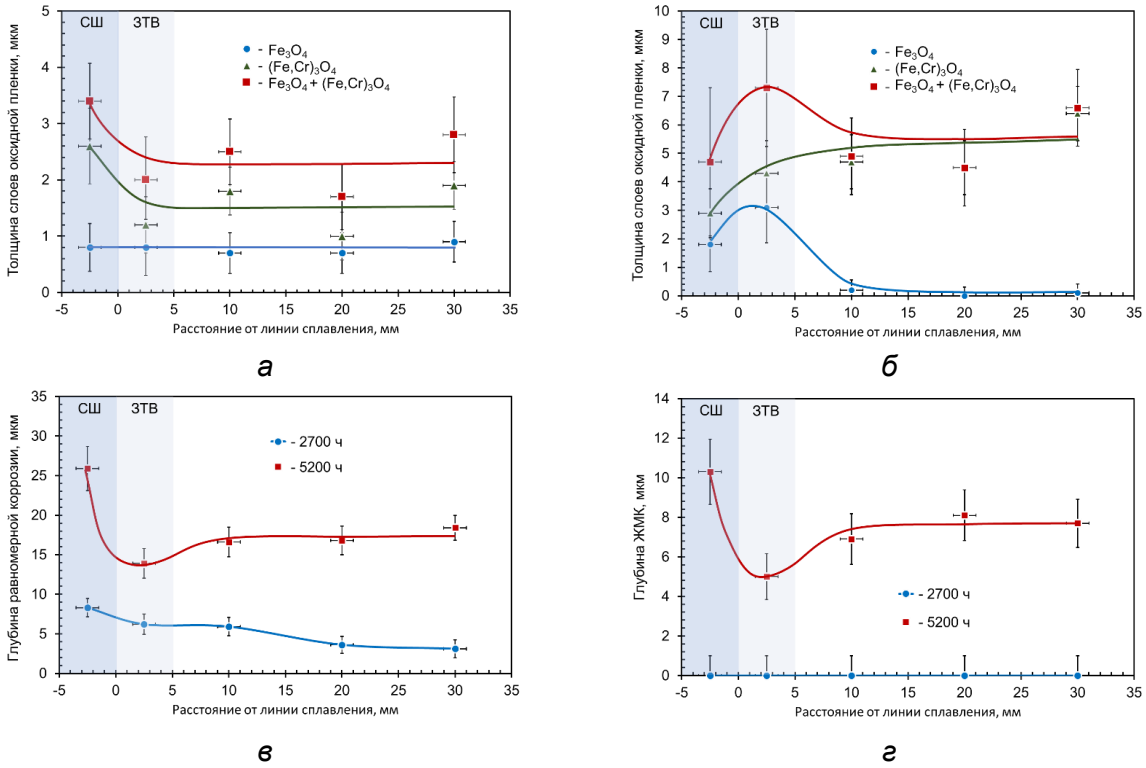
Характерные фотографии внешнего вида образцов сварных соединений и основного металла стали ЭП302-Ш после коррозионных испытаний приведены на рисунке 6. Результаты определения показателей коррозии стали ЭП302-Ш, полученные на основе геометрических измерений толщины образцов до и после испытаний, а также измерений толщины слоев ПК и глубины локальных видов коррозии приведены на рисунке 7.



а, б - образец СС № 1-5-6; в, г - образец ОМ № 1-5-10; а, в – до испытаний; б, г – после испытаний

Рисунок 6 – Внешний вид образцов СС и ОМ до и после коррозионных испытаний с нанесенными точками измерений толщины образцов до и после испытаний

Согласно рисунку 7а, продукты коррозии на всех материалах (СШ, ОМ+ЗТВ и ОМ) образцов сварных соединений стали ЭП302-Ш после 2700 ч испытаний имеют двухслойное строение. При этом независимо от типа материала сварных соединений (материал сварного шва, материал основного металла или основной металл в зоне термического влияния) толщина внешнего слоя ПК на этих материалах практически одинакова и равна ~0,8±0,4 мм. Согласно данным оптической металлографии, этот внешний слой ПК имеет неоднородное и пористое строение и представляет собой слой магнетита Fe_3O_4 (рис. 8).



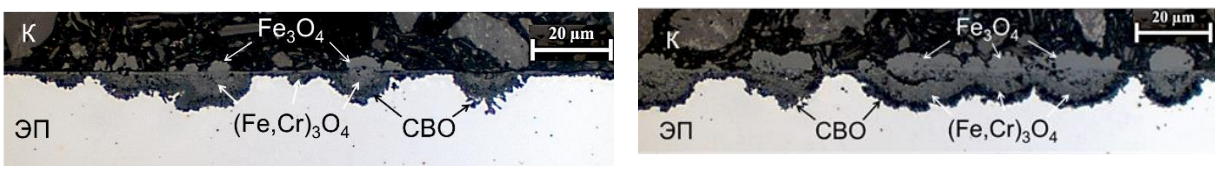
а – коррозионные потери q; б – толщина оксидной пленки δ; вынос ПК W

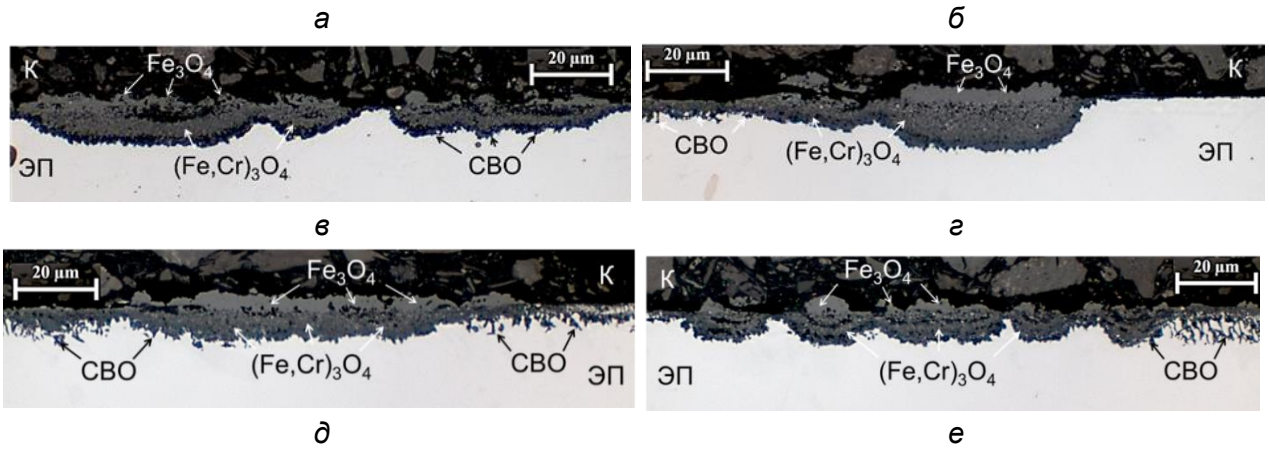
Рисунок 7 – Влияние длительности испытаний на изменение показателей коррозии материалов ОМ и СС стали ЭП302-Ш в свинце при 540±15 °С с содержанием кислорода

Внутренний слой ПК представляет собой фазу железо-хромистой шпинели типа $(Fe,Cr)_3O_4$, выявленную рентгенофазовым анализом. Шпинель также как и слой магнетита имеет неоднородный характер распределения по поверхности всех материалов, однако в отличие магнетита, выявлено влияние состояния материалов на толщину слоя шпинели. Наибольшей толщины слои шпинели, равные ~2,6±0,7 мкм, образуются на поверхности материала сварного шва (рис. 6а). Толщина слоя шпинели на материалах ОМ находится в пределах от ~1,0 до ~1,9 мкм (рис. 7а).

На всех материалах стали под слоем шпинели после 2700 ч испытаний было выявлено наличие слоя внутреннего окисления (ВО) с глубиной проникновения в металл на уровне ~0,9-2,4 мкм. Наибольшая толщина слоя ВО также наблюдалась на материале сварного шва (рис. 8а).

Раздельные испытания с увеличением времени до 5200 ч приводят к существенным изменениям в характере формирования ПК на поверхности различных материалов. Если после 2700 ч испытаний наружный слой ПК из магнетита Fe_3O_4 наблюдался на всех материалах и имел практически одинаковую толщину, то после 5200 ч слой Fe_3O_4 наблюдался только на материале СШ и в области ЗТВ соответственно толщиной ~1,8±0,9 и ~3,1±1,2 мкм. На ОМ, находящемся на расстоянии L>5,0 мм, толщина слоя Fe_3O_4 находится на уровне погрешности измерения ~0,2 мкм.



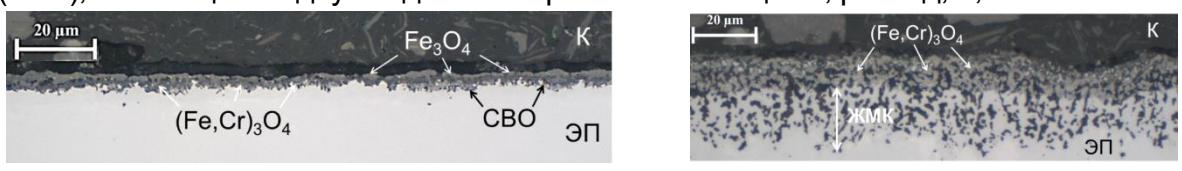


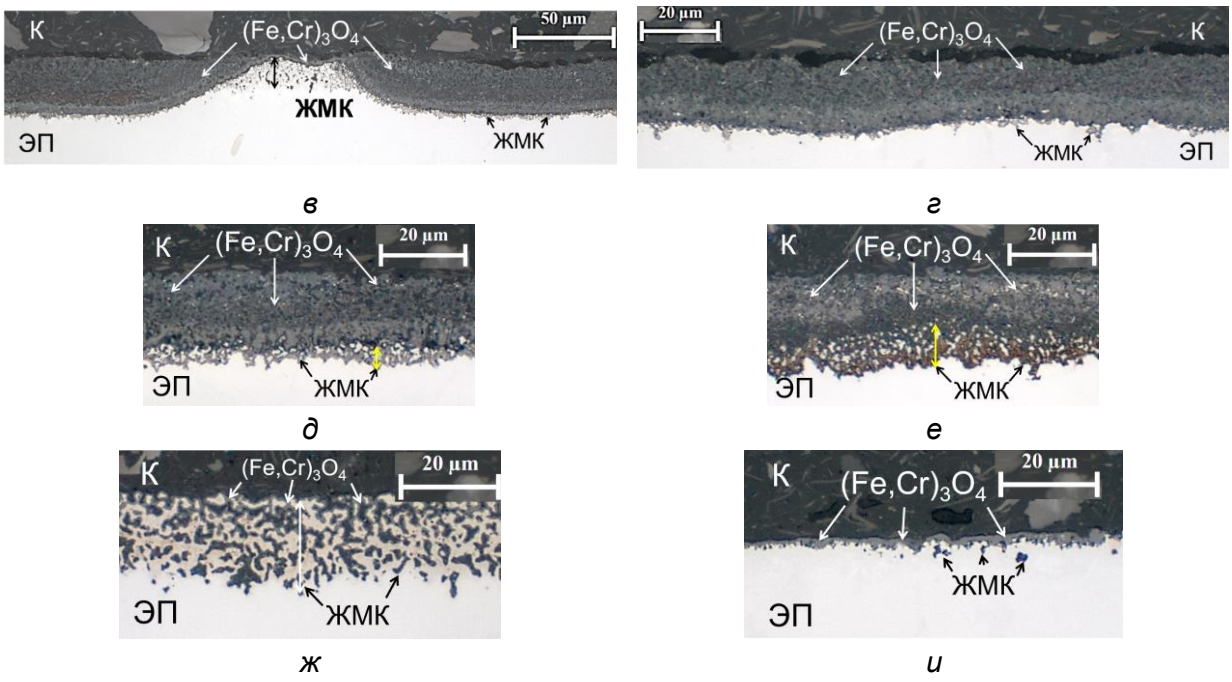
а, б – материал СШ; в, г – ЗТВ ОМ; д, е – ОМ на L=5-15 мм от линии сплавления

Рисунок 8 – Микроструктура коррозионной зоны на материалах СС стали ЭП302-Ш после коррозионных испытаний в течение 2700 часов в свинце при 540±15 °С

При увеличение времени испытаний до 5200 ч толщина слоя шпинели увеличивается в ~2 раза на ОМ, в том числе и в области ЗТВ, и практически остаётся на том же уровне на материале СШ (рис. 9). Слой шпинели, состоящий после 2700 ч испытаний из неоднородных образований шарообразной и чечевичной формы (рис. 8), после 5200 ч испытаний представляет практически непрерывную полосу с одинаковой толщиной на участках большой протяженности (рис. 9б-е). При этом слой шпинели становится более дефектным и содержащим большое количество пор разной формы и размеров (рис. 9б-е). Наибольшее количество пор крупных размеров наблюдается в слое шпинели, образованной на материале СШ (рис. 9б). На материале ОМ с наличием ЗТВ и без термического воздействия слой шпинели содержит поры значительно меньшего размера и в большем количестве по сравнению со слоем шпинели на СШ (рис. 9в-е).

Наиболее существенным отличием испытаний длительностью 5200 часов от испытаний продолжительностью 2700 ч является появление очагов с локальными видами жидкометаллической коррозии (ЖМК) под воздействием свинца на материалы стали ЭП302-Ш (рис. 9г). Согласно рисунку. 9б, наибольшая глубина очагов ЖМК наблюдается на материале сварного шва, значения которой изменяются в широких пределах от ~3 до ~23 мкм, при среднем значении 10,3±1,3 мкм. Наименьшие значения глубины ЖМК выявлены в области ЗТВ основного металла (рис. 9в). Среднее значение глубины слоя ЖМК $h_{ЖМК}$ в этой области составляет 5,0±0,6 мкм. Средние значения глубины слоя ЖМК $h_{ЖМК}$ на участках ОМ, находящихся на расстоянии L>5,0 мм от линии сплавления, имеют промежуточные величины между значениями $h_{ЖМК}$ для материалов СШ и ОМ(ЗТВ), равные 7,6±0,8 мкм. На этих участках ОМ выявлена общая закономерность, заключающаяся в образовании полосы коррозионного повреждения (ПКП), состоящей из двух подслоев переменной толщины, рис. 9д, е, ж.





а, б – материал СШ; в, г – ЗТВ ОМ; д - е – ОМ на L=5-35 мм от линии сплавления

Рисунок 9 – Микроструктура коррозионной зоны на материалах СС стали ЭП302-Ш после коррозионных испытаний в течение 5200 часов в свинце при 540±15 °С

Следует отметить, что на поверхности образцов ОМ с L>5,0 мм имеются участки с очень малой степенью коррозионного поведения, на которых формируется лишь очень тонкий практически бездефектный слой железо-хромистой шпинели толщиной ~1,0-1,5 мкм, под которыми отмечается наличие слоя ЖМК с глубиной ~3 мкм (рис. 9и).

На рис. 7в приведены графические зависимости изменения глубины равномерной коррозии $h_р$ на материалах сварных соединений стали ЭП302-Ш после коррозионных испытаний в течение 2700 и 5200 ч (в данном случае под равномерной коррозией понимается коррозия стали на участках либо без очагов ЖМК, либо с очень незначительной типа приведенных на рис. 9в и 9г). Согласно этим данным наибольшая глубина равномерной коррозии после 2700 ч испытаний наблюдалась на материалах СШ и ОМ(ЗТВ), равная соответственно ~8,3±1,3 и ~6,2±1,2 мкм и по мере удаления от линии сплавления она снижалась до величины ~3,1÷3,6 мкм на материале ОМ на расстоянии 15-35 мм от линии сплавления (рис. 7.в).

После испытаний длительностью 5200 ч глубина $h_р$ на материале СШ довольно резко (почти в 3 раза) возрастает, достигая среднего значения 25,9±2,8 мкм (рис. 7в). В то время как средние значения $h_р$ на материале ОМ в области ЗТВ имели наименьшие значения, равные ~13,9±1,9 мкм, по сравнению с материалами СШ и ОМ с L>5,0 мм, на последних из которых $h_р$ находилась в пределах от ~16,6 до ~18,4 мкм на L=5-35 мм (рис. 7в).

Основываясь на диаграмме термодинамической устойчивости основных легирующих элементов сталей, проведен анализ влияния отклонений содержаний кислорода в свинце в сторону снижения до уровней $(0,4÷3,8)\cdot10^{-8}$ и $(1,5÷7,6)\cdot10^{-10}$ масс. % соответственно в 1-м и 2-м этапах коррозионных испытаний

на выявленные различия характера коррозионного поведения материалов сварных соединений стали ЭП302-Ш.

Проведенные оценки показывают, что за время 1-го цикла испытаний при 540±15 °С при среднем содержании кислорода в свинце, равным $7{,}8 \cdot 10^{-7}$ масс. %, на поверхности всех образцов стали ЭП302-Ш могла образоваться двухслойная оксидная пленка из шпинели и магнетита примерно одинаковой толщины каждая (~1,2 мкм) после 1-го цикла испытаний.

В начале 2-го цикла 1-го этапа испытаний в течение ~80 ч имело место снижение содержание кислорода в свинце до среднего уровня ~$1{,}8 \cdot 10^{-8}$ масс. %, что могло привести к частичной или полной диссоциации лишь слоя магнетита без разрушения слоя шпинели.

При проведении 2-го этапа коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш понижение содержания кислорода в свинце, равного диапазону $(1{,}5 \div 7{,}6) \cdot 10^{-10}$ масс. %, имел место в самом начале коррозионных испытаний и продолжался в течение почти 104 ч. Таким образом, уже с самого начала испытаний неоксидированные образцы стали ЭП302-Ш были подвержены агрессивному коррозионному воздействию свинца, практически не содержащему кислород. В результате началось химическое растворение по границам зерен таких элементов стали в свинце, как никель, хром и железо, имеющих высокую растворимость, с образованием очагов ЖМК различной глубины и протяженности, которые в последующие циклы испытаний в свинце более насыщенном по содержанию кислорода либо частично, либо полностью превратились в продукты коррозии.

На основании этих данных можно сделать заключение, что материалы основного металла и сварных соединений стали ЭП302-Ш являются очень склонными к образованию и развитию очагов ЖМК при пониженных значениях содержания кислорода в свинце и требуют внимательного обращения с ними, особенно, в начальные стадии запуска в эксплуатацию оборудования, изготовленного из них.

Выводы

С использованием геометрического метода проведено определение показателей коррозии материалов сварных соединений аустенитной хромоникелевой стали ЭП302-Ш, выбранной в качестве материала бака и технологических трасс первого контура РУ БРЕСТ-ОД-300, после коррозионных испытаний в течение 2700 и 5200 ч при 540±15 °С в потоке свинца с содержанием кислорода $(0{,}8\text{-}1{,}8) \cdot 10^{-6}$ и ~$2{,}2 \cdot 10^{-6}$ масс. % соответственно. На 1 этапе в начале 2-го цикла испытаний в течение ~80 ч имело место снижение содержания кислорода до уровня $(0{,}4 \div 3{,}8) \cdot 10^{-8}$ масс. %. В период второго этапа длительностью 5200 часов в начале 1-го цикла испытаний в течение ~99 ч имело место снижение содержания кислорода до уровня $(1{,}5 \div 7{,}6) \cdot 10^{-10}$ масс. % и в начале 2-го цикла испытаний в течение 49 часов содержание кислорода находилось в пределах $(6\text{-}9) \cdot 10^{-10}$ масс. %.

В процессе первой экспозиции 2700 ч коррозионных испытаний были выявлены следующие закономерности:

- материалы сварных соединений (сварного шва, основного металла в области ЗТВ и вне термического воздействия) не подвержены жидкометаллической коррозии;

- на поверхности всех исследуемых материалов сварных соединений образуется двухслойная оксидная пленка, состоящая из внешнего слоя из Fe_3O_4 толщиной ~0,8 мкм, и внутреннего слоя из шпинели типа $(Fe,Cr)_3O_4$ с наибольшей толщиной ~2,6 мкм на материале СШ и практически одинаковой толщины на материале ОМ;

- под слоями оксидной пленки на всех материалах СС имеется слой внутреннего окисления с наибольшей глубиной проникновения ~2,6 мкм на материале СШ и практически одинаковой глубины 0,9-1,8 мкм на материале ОМ.

Пониженное содержание кислорода в свинце на начальных стадиях испытаний приводит к образованию очагов жидкометаллической коррозии на всех материалах СС стали, отсутствию слоя внутреннего окисления и образованию только однослойной оксидного пленки из шпинели на материале ОМ.

О.А. Голосов, Ю.С. Романченко, С.С. Хвостов, Н.В. Глушкова, Е.В. Шабельников

Методика оценки длительности периода пассивации поверхности ОУ стенда «Урал-коррозия» при проведении коррозионных испытаний

Отличительной особенностью реакторных петель с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) от внереакторных установок подобного типа является невозможность многократного использования рабочих участков. Это обусловлено целым рядом объективных причин: малыми размерами мест для облучательных устройств (ОУ) внутри активной зоны, длинными трассами внутри бака реактора (до ~7 м), необходимостью электрообогрева по всей длине гидравлического тракта, необходимостью гидро- и теплоизоляции тракта в баке реактора, необходимость слива свинца для извлечения навесок с образцами, защита персонала от облучения и т.п. Сборка ОУ проводится одновременно с установкой в них исследуемых образцов с последующей обвязкой всего облучательного устройства. Все это приводит к практической невозможности пассивации больших поверхностей контуров ОУ (по сравнению с площадями исследуемых материалов) до проведения испытаний. Поэтому пассивация поверхностей материалов ОУ проводится одновременно с началом проведения коррозионных испытаний исследуемых образцов.

Для исключения образования шламовых отложений необходимым условием перед началом коррозионных испытаний является подготовка свинца, заключающаяся в обработке расплава свинца инертным газом, содержащим водород, до достижения содержания кислорода в свинце на уровне 10^{-7}-10^{-8} масс.%. После этого производится заполнение этим расплавом объема петлевых установок. И только после заполнения петли свинцом начинается выход на заданные параметры по содержанию кислорода. Однако контакт больших неоксидированных площадей контура ОУ с расплавом свинца с содержанием кислорода на уровне 10^{-7}-10^{-8} масс.% может приводить к дальнейшему и достаточно резкому снижению содержания кислорода в объеме ОУ, в том числе в области расположения исследуемых образцов.

Поэтому, а также учитывая протяженные трассы контура циркуляции свинца, довольно малые скорости потока свинца в контуре стенда «Урал-коррозия» и удаленность расположения ДАК от рабочих участков с образцами, возникла необходимость оценки длительности начального периода до наступления признаков пассивации образцов стали ЭП302-Ш при проведении коррозионных испытаний в период с 04.04.2024 по 27.01.2025 г.

Для проведения работы (аналогично предыдущей работе) весь гидравлический тракт стенда «Урал-Коррозия» с циркулирующей основной массой свинца был разбит на 8 участков, отличающихся геометрическими, гидравлическими и температурными параметрами испытаний (рис. 10).

Для оценки количества кислорода, потребляемого неоксидированными поверхностями ОУ, использовалось выражение для расчета толщины оксидной пленки, полученное АО ИРМ на основе обработки всего массива экспериментальных данных по коррозии сталей в свинце, следующего вида:

$$\delta = 1{,}16 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-\frac{7490}{T+273}} \cdot t^{0.5} \cdot \left(\frac{[O]_p}{[O]_s}\right)^{0.15} \cdot \left(\frac{[Cr]}{12}\right)^{-0.65} \cdot [Ni]^{0.08} \cdot [Si]^{-0.27} \cdot [Al]^{-0.15} \cdot v^{0.23}, \quad (1)$$

где δ - толщина оксидной пленки, мкм; T - температура испытаний, °С; t - время испытаний, ч; $[O]_p$ - содержание кислорода в свинце, масс. %; $[O]_s$ - содержание кислорода в свинце, соответствующее линии равновесия $Fe+O \leftrightarrow Fe_3O_4$, масс. %; [*Cr*] - содержание хрома в стали, масс. %; [*Ni*] - содержание никеля в стали, масс. %; [*Si*] - содержание кремния в стали, масс. %; [*Al*] - содержание алюминия в стали, масс. %; υ - скорость потока свинца, м/с.

Оценка количества кислорода, потребляемого неоксидированными поверхностями ОУ, проводилась итерационным способом. Для этого все *i*-е участки циркуляционного контура ОУ дополнительно разбивались на *j*-е участки меньшей и равной длины 100 мм, характеристика параметров этих участков, необходимых для проведения итерационного расчета приведена в таблице 1.

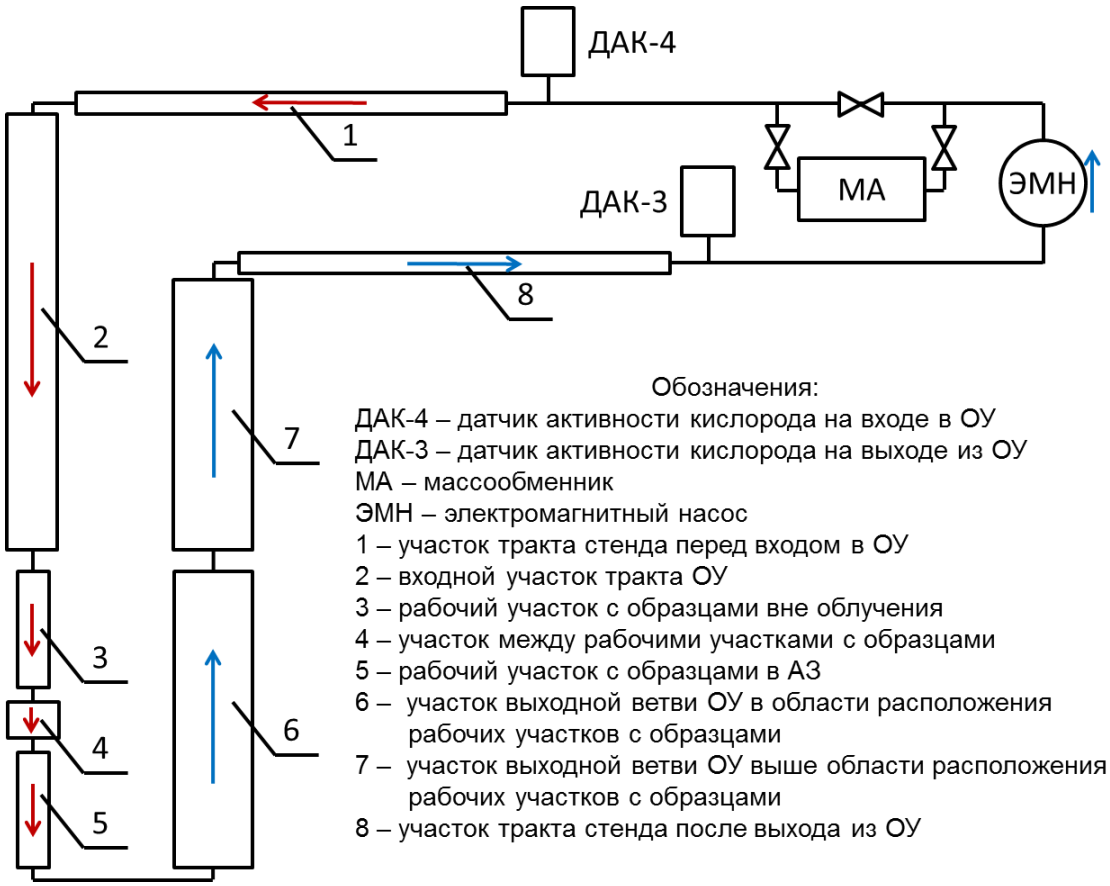


Рисунок 10 - Циркуляционный тракт потока свинца стенда «Урал-коррозия» при проведении коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш

Таблица 1 - Характеристика участков контура циркуляции в ОУ стенда «Урал-Коррозия»

Номер *i*-го участка контура ОУ	Общая характеристика *I*-х участков ОУ			Характеристика *j*-х участков длиной 100 мм	
	Общая длина, дм	Условный диаметр поперечного сечения, см	Температура свинца, °С	Площадь поверхности *S*, см^2	Масса Pb, г
1	50	0,60	420	18,84	29,826
2	56	0,99	420	69,08	102,736
3	5	0,85	540	89,00	90,757
4	5	0,99	540	69,08	101,241
5	5	0,85	540	89,00	90,757
6	15	1,50	540	113,00	235,141
7	56	1,50	420	113,00	238,612
8	50	0,60	420	18,84	29,826

Массу кислорода $m(O)_{I,j}$, потраченного на образование оксидной пленки на *I,j*-том участке трассы ОУ за время прохода свинцом этого участка рассчитывали по выражению:

$$m(O)_{i,j} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot (\delta(t_{k+1}) - \delta(t_k)) \cdot S \cdot \alpha \cdot \rho_{ok}, \quad (2)$$

где $1 \cdot 10^{-4}$ - коэффициент перевода мкм в см, $\delta(t_k)$ - толщина оксидной пленки на поверхности участка ОУ до входа свинца в участок, мкм; $\delta(t_{k+1})$ - толщина оксидной пленки на поверхности участка ОУ после выхода свинца из участка, мкм; *S* - площадь поверхности участка, контактирующая со свинцом, см^2; α - коэффициент, соответствующий массовой доле содержания кислорода в молекуле магнетита отн. ед.; $\rho_{ок}$ - плотность магнетита, принята равной 5,25 г/см^3.

Полученное значение массы $m(O)_{I,j}$, потраченного на образование оксидной пленки на *I,j*-том участке трассы ОУ, использовалось для определения содержания кислорода в свинце на участке входа в следующий участок. Расчет этой величины проводили по выражению

$$[O]_{i,j+1} = [O]_{i,j} - \frac{100 \cdot m(O)_{i,j}}{m(Pb)_{i,j}} \quad (3)$$

где $[O]_{I,j+1}$ - процентное содержание кислорода в свинце на выходе из *I,j*-го участка (или на входе в *I,j+1* участок трассы ОУ), масс. %; $[O]_{I,j}$ - процентное содержание кислорода в свинце на входе в *I,j*-й участок трассы ОУ, масс. %; 100 - коэффициент перевода относительного массового содержания кислорода в свинце в масс. %; $m(O)_{I,j}$ - масса кислорода в образовавшейся оксидной пленке на поверхности *I,j*-го участка трассы ОУ, определяемое выражением (2), г; $m(Pb)_{I,j}$ - масса свинца в объеме *I,j*-го участка трассы ОУ, г.

Аналогичные вычисления продолжаются со следующими по порядку расположения участками трассы ОУ, до тех пор, пока не будут достигнуты отрицательные значения содержания кислорода в свинце. Далее процессы вычисления выполняются для других временных точек испытаний до тех пор, пока не будут достигнуты значения содержания кислорода, соответствующие показаниям ДАК-3 на выходе и ОУ.

На рисунке 11 приведены кинетические зависимости изменения содержания кислорода на входе и выходе из ОУ в первом цикле длительных реакторных коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш, выполненных в период с 04.04.2024 по 27.01.2025 г.

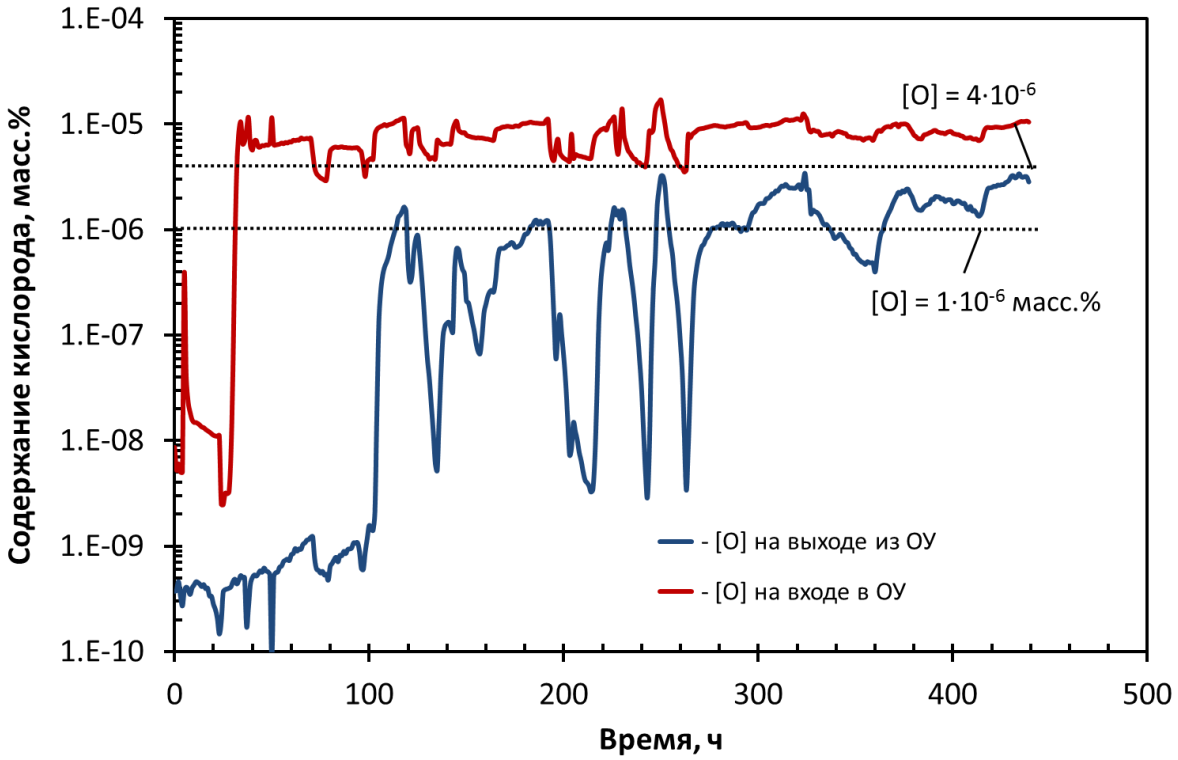


Рисунок 11 - Кинетические зависимости изменения содержания кислорода на входе и выходе из ОУ в первом цикле длительных реакторных коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш

Согласно данным, приведенным на рисунке 11, даже на протяжении почти 30 часов после предпусковой обработки свинца не удавалось вывести параметры стенда на требуемые значения по содержанию кислорода в свинце не только выходе из ОУ, но и на входе. Однако даже после этого периода вплоть до длительности испытаний ~100-120 ч сказать чего-либо определенного о содержании кислорода в области расположения образцов по показаниям обоих ДАК не представляется возможным.

Результаты обработки по вышеприведенной методике начальной стадии длительных реакторных коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш, выполненных в период с 04.04.2024 по 27.01.2025 г., приведены на рисунке 12. Расчеты выполнены для стали 12Х18Н10Т как основного материала ОУ при средней концентрации кислорода на участке ~30-~100 ч первого цикла испытаний, равной ~$6 \cdot 10^{-6}$ масс. % (рис. 11) и расходе свинца через ОУ, верифицированным по данным ДАК-3 для длительности испытаний 70, 75 и 90 ч (рис. 12).

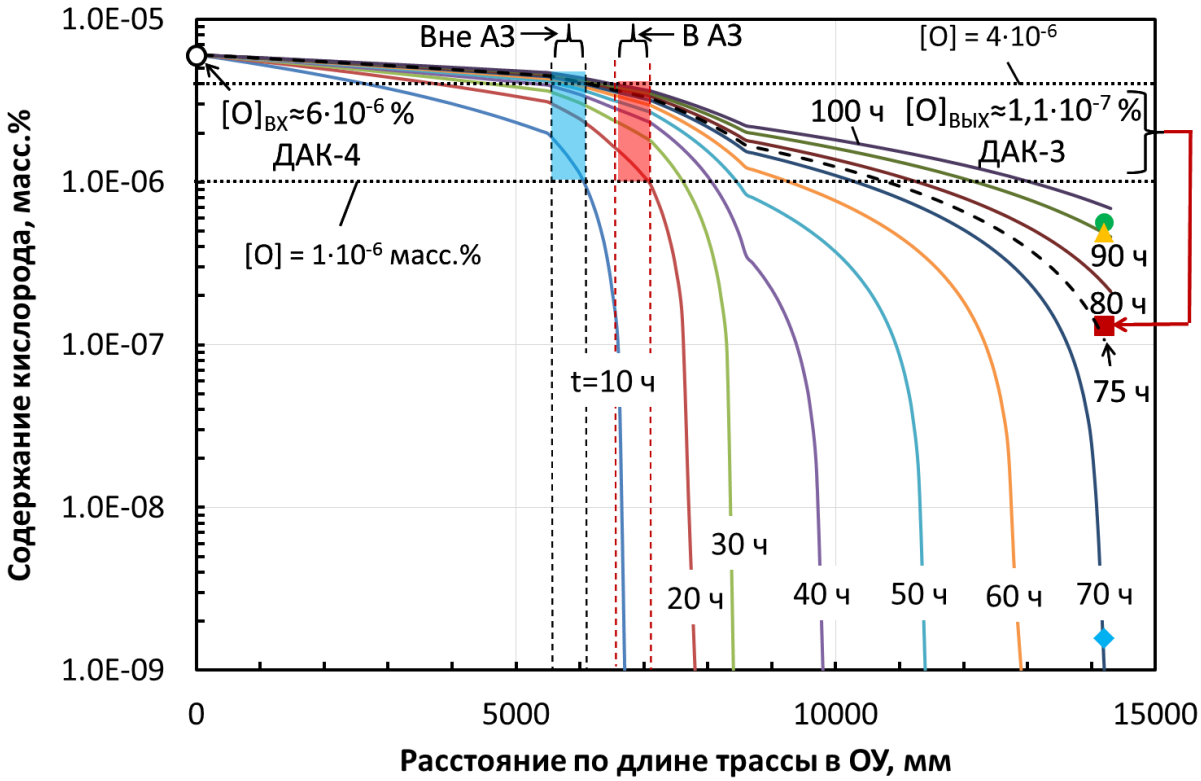


Рисунок 12 - Изохорические зависимости изменения содержания кислорода в свинце по длине трассы ОУ в начальной стадии испытаний образцов стали ЭП302-Ш при 540 °С (по результаты итерационных расчетов)

Из данных, приведенных на рис. 12, следует, что достаточно интенсивно происходит достижение требуемых параметров по содержанию кислорода на участках расположения исследуемых образцов, как вне облучения (прямоугольник голубого цвета), так и под облучением (прямоугольник красного цвета). Так, для достижения нижней границы базового режима $1 \cdot 10^{-6}$ масс % для образцов вне облучения, согласно оценкам, потребовалось ~10 часов, а для образцов в области облучения ~20 ч.

Таким образом, предложенная методика позволяет проводить более точные оценки содержания кислорода в области расположения исследуемых образцов в ОУ, а также проводить оценку длительности периода пассивации материалов контура циркуляции свинца в ОУ.

О.А. Голосов, С.С. Хвостов, Ю.С. Романченко, Н.В. Глушкова, Е.В. Шабельников

Оценка скорости потока свинца в ОУ стенда «Урал-коррозия» при проведении коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш при 570 °С

Одним из важных факторов, оказывающих влияние на коррозионное поведение сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (ТЖМТ), является скорость потока расплавленного металла, контроль величины которого является необходимым при проведении коррозионных испытаний.

Отсутствие в контуре циркуляции стенда «Урал-Коррозия» датчика измерения расхода свинца затрудняет проведение прямых оценок скорости его потока в облучательном устройстве (ОУ) в области расположения исследуемых образцов в форме пластин из стали ЭП302-Ш. В настоящей работе предложена методика проведения косвенной оценки скорости потока свинца, основанная на измерении времени задержки реакции на изменение показаний активности кислорода между датчиками на входе (ДАК-4) и выходе (ДАК-3) из ОУ.

Для проведения работы весь гидравлический тракт стенда «Урал-Коррозия» с циркулирующей основной массой свинца был разбит на 8 участков, отличающихся геометрическими, гидравлическими и температурными параметрами испытаний (рис. 13). Характеристика участков приведена в таблице 2.

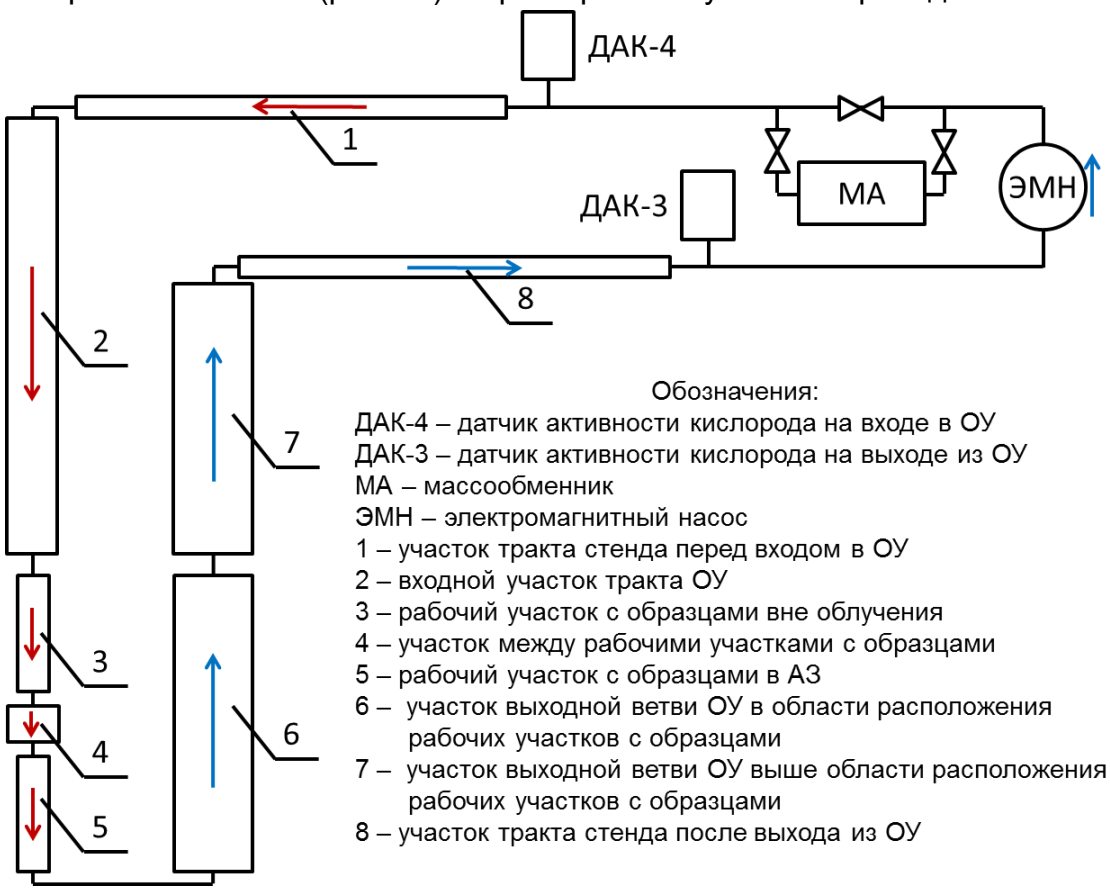


Рисунок 13 - Циркуляционный тракт потока свинца стенда «Урал-коррозия» при проведении коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш

В период с 04.04.2024 по 27.01.2025 г. в течение 12 реакторных циклов работы ИЯУ ИВВ-2М были проведены реакторные коррозионные испытания основного металла и сварных соединений стали ЭП302-Ш. Для определения времени задержки $\Delta t_з$ реакции на изменение показаний активности кислорода между датчиками на входе и выходе из ОУ был выбран 5-й цикл коррозионных испытаний, проведенный в период с 01.08.2024 г. по 19.08.2024 г. и в котором на графиках зависимостей [O] = *f(t)* ДАК-4 и ДАК-3 имелось достаточно большое количество точек перегиба, необходимых для анализа (рис. 14).

Таблица 2 - Характеристика участков контура циркуляции Pb в стенде «Урал-Коррозия»

Номер участка	Длина, дм	Условный диаметр поперечного сечения, дм	Площадь поверхности, дм^2	Объем, дм^3	Температура свинца, °С
1	50	$6{,}0\cdot10^{-2}$	9,42	0,141	420
2	56	$9{,}9\cdot10^{-2}$	38,69	0,545	420
3	5	$8{,}5\cdot10^{-2}$	4,45	$4{,}36\cdot10^{-2}$	540
4	5	$9{,}9\cdot10^{-2}$	3,45	$4{,}87\cdot10^{-2}$	540
5	5	$8{,}5\cdot10^{-2}$	4,45	$4{,}36\cdot10^{-2}$	540
6	15	0,150	16,96	0,339	540
7	56	0,150	63,30	1,226	420
8	50	$6{,}0\cdot10^{-2}$	9,42	0,141	420

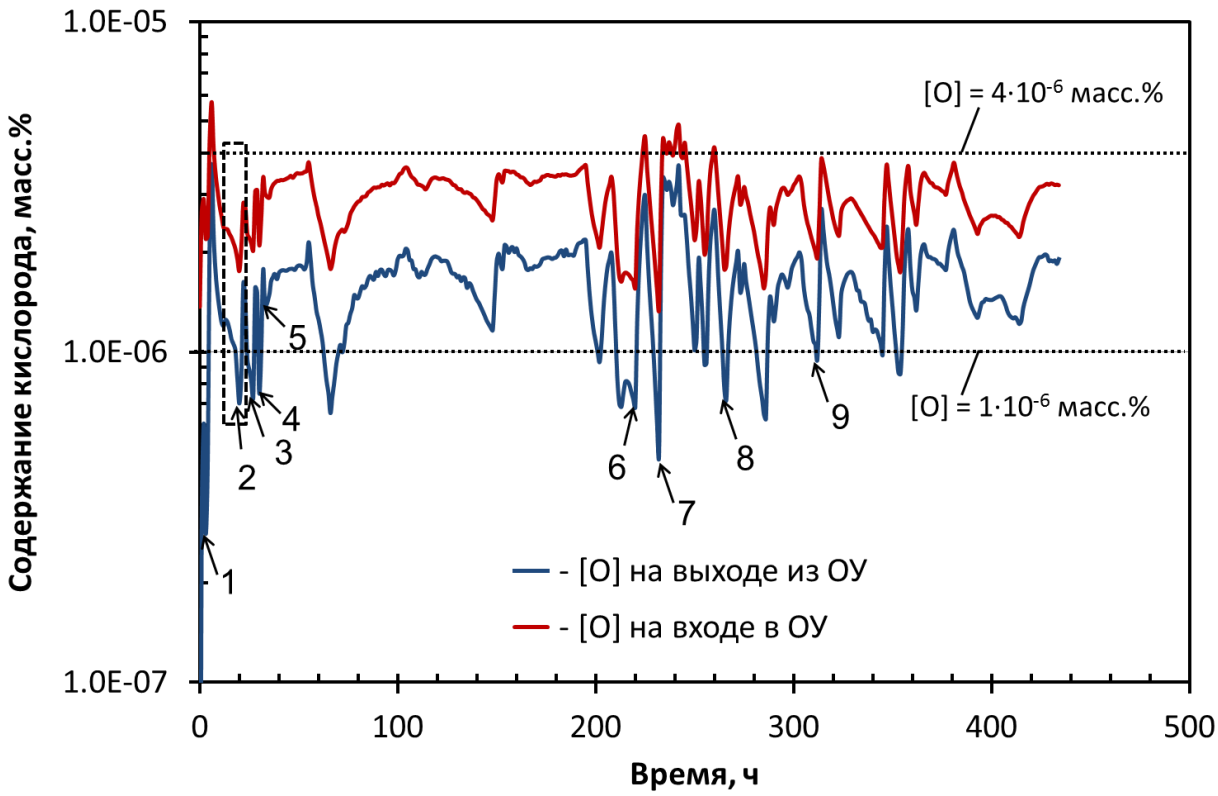


Рисунок 14 - Кинетические зависимости изменения содержания кислорода на входе и выходе из ОУ в процессе 5-го цикла коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш

Проведена оценка скорости потока свинца с использованием 9 различных участков на кинетических зависимостях [O] = *f(t)* для ДАК-4 и ДАК-3 на начальных,

средних и заключительных стадиях 5-го цикла коррозионных испытаний (рис. 14). Для проведения анализа выбирались участки с точками изменения наклона левых и правых ветвей кривых [O] = *f(t)* относительно выбранной временной точки. Для определения Δt_3 для каждого выбранного участка [O] = *f(t)* строились частные графики (см. рис. 15), на которых определялись выражения трендов для левых и правых ветвей кривых, с использованием которых в дальнейшем производились количественные оценки значений точек перегиба, по разнице которых и определялась величина Δt_3. Расчеты для 9 выбранных участков на кинетических зависимостях [O] = *f(t)* для ДАК-4 и ДАК-3 приведены в таблице 3.

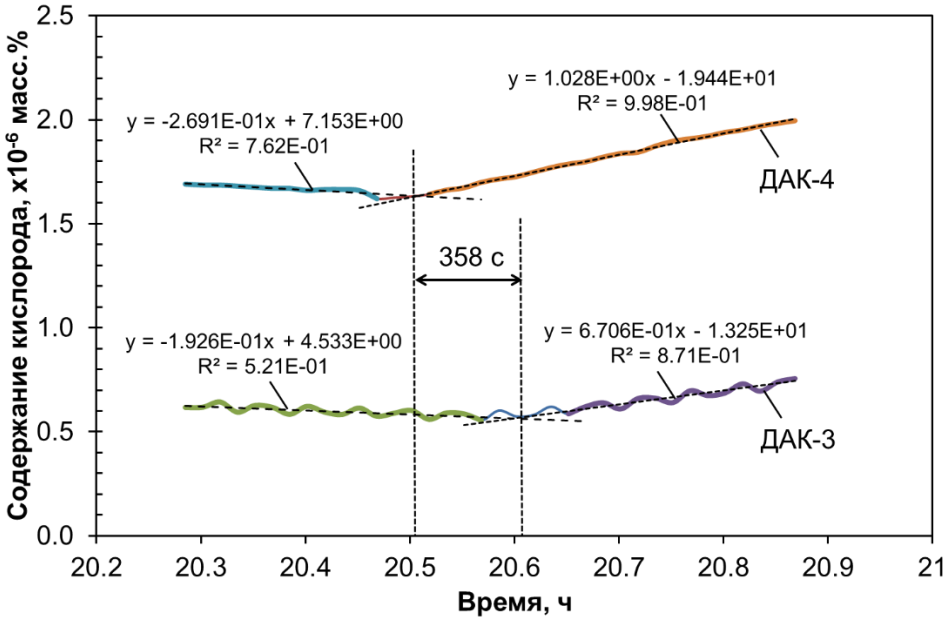


Рисунок 15 - Графико-аналитический анализ определения Δt_3 участка кинетических зависимостей, обозначенного на рис. 14 прямоугольной областью

Таблица 3 - Результаты расчета гидравлических параметров потока Pb в 5-м цикле коррозионных испытаний образцов стали ЭП302-Ш стенде «Урал-коррозия», этап 2025 г.

Номер участка [O] = *f(t)*	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Период испытаний, ч	3,6-4,2	20,3-20,9	27,2-27,8	28,2-28,8	30,2-30,8	219,8-220,5	231,9-232,6	250,3-251,1	311,9-313,3
Δt_3, с	304	358	211	150	424	680	454	768	516
Средняя скорость, см/с	8,22	6,99	11,8	16,7	5,90	3,68	5,51	3,25	4,85
Расход, $дм^3/с$	$8,5\cdot10^{-3}$	$7,2\cdot10^{-3}$	$1,2\cdot10^{-2}$	$1,7\cdot10^{-2}$	$6,1\cdot10^{-3}$	$3,8\cdot10^{-3}$	$5,7\cdot10^{-3}$	$3,3\cdot10^{-3}$	$5,0\cdot10^{-3}$
Скорость в рабочих участках, см/с	9,7	8,2	14,0	19,6	6,9	4,3	6,5	3,8	5,7

Согласно данным таблицы 3, в период 5-го цикла коррозионных испытаний средняя скорость потока свинца в тракте стенда «Урал-коррозия» от ДАК-4 до ДАК-3 находилась в довольно широком диапазоне изменений от ~3 до ~17 см/с, что может свидетельствовать о нестабильном поддержании напряжения на электромагнитном насосе.

Учитывая, что почти половина гидравлического тракта свинца стенда «Урал-коррозия» приходится на подводящие и отводящие трубопроводы самого стенда (достигающие суммарную длину ~10 м), то значения скорости потока свинца в области расположения образцов при испытаниях, находились почти в том же диапазоне значений от ~4 до ~20 см/с. Довольно низкие значения скорости потока свинца, которые можно достигать в стенде «Урал-коррозия», свидетельствуют о необходимости модернизации стенда.

О.А. Голосов, С.С. Хвостов, Ю.С. Романченко,
Н.В. Глушкова, Е.В. Шабельников

Исследования образцов конструкционного графита, разработанного в рамках проекта по созданию атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (ВТГР)

С 2021 года в рамках Инвестиционной программы АО «Концерн Росэнергоатом» реализуется комплексная программа НИОКР по разработке технологических решений для создания атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и химико-технологической частью (АЭТС с ВТГР и ХТЧ) для производства водородсодержащих продуктов.

В рамках программы НИОКР по АЭТС с ВТГР и ХТЧ, в числе прочего, предприятиями Госкорпорации «Росатом» ведется разработка и исследование свойств реакторного графита нового поколения с повышенными эксплуатационными характеристиками (основного конструкционного материала а.з. ВТГР), а также разработка опытно-промышленной технологии изготовления крупноблочного реакторного графита.

В данной работе приведены результаты до- и послереакторных исследований по определению предела прочности при растяжении образцов графита из крупногабаритных блоков в широком диапазоне температур (от 20 до 1600 °С).

Объектами исследований являлись образцы графита, вырезанные из крупногабаритных блоков в двух направлениях: параллельно оси прессования (//) и перпендикулярно оси прессования (⊥).Эскиз образца графита из крупногабаритных блоков для испытаний при растяжении приведён на рисунке 16.

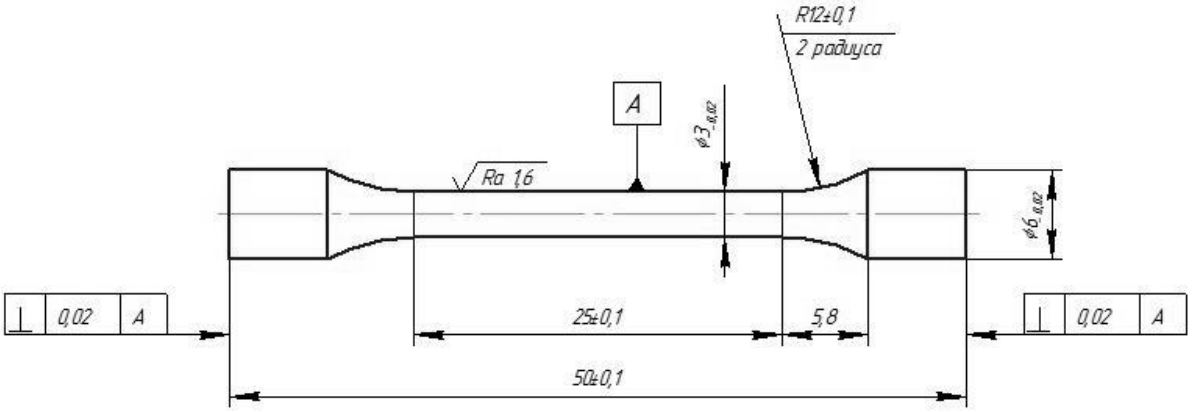


Рисунок 16 – Эскиз образца графита из крупногабаритных блоков

Испытания образцов, как в исходном, так и в облученном состоянии, проводились в вакууме при шести значениях температуры: без нагрева, 400, 700, 900, 1200 и 1600 °С.

На рисунке 17 представлен график зависимости предела прочности при растяжении образцов графита из крупногабаритных блоков в исходном состоянии от температуры испытаний.

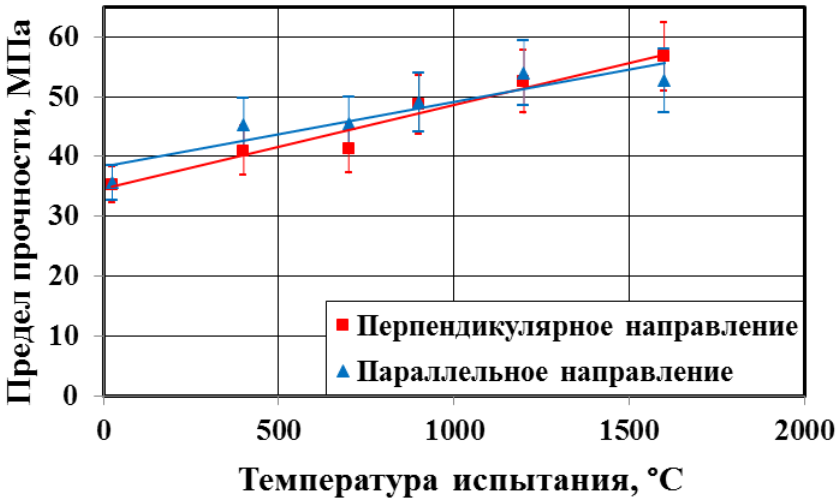
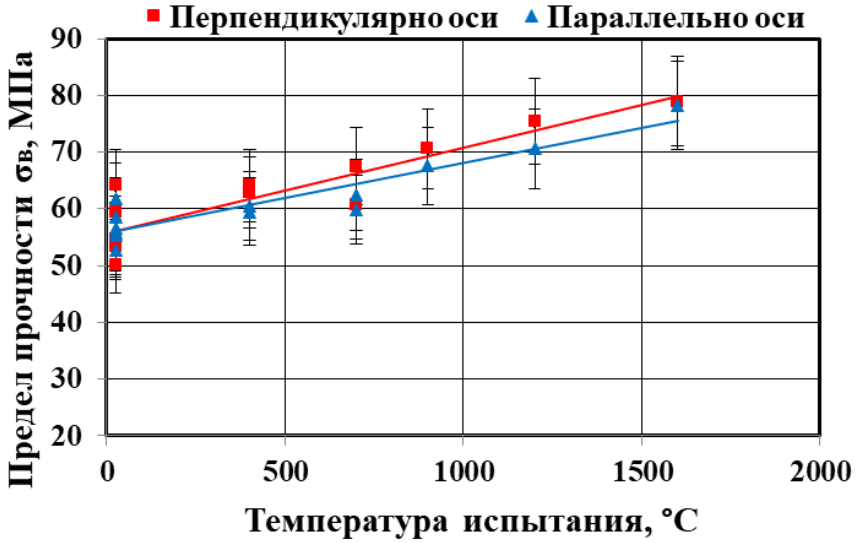


Рисунок 17 - График зависимости предела прочности образцов графита из крупногабаритных блоков в исходном состоянии от температуры испытаний

Полученные результаты испытаний образцов графита из крупногабаритных блоков в исходном состоянии показали, что температура испытаний оказывает существенное влияние на прочностные характеристики материала графита, в интервале температур от комнатной (без нагрева) до 1600 °С. Значения предела прочности образцов графита с ростом температуры испытаний монотонно возрастают в среднем на (50 ÷ 55) % (с 35 до 53 МПа в продольном и до 57 МПа в поперечном направлениях).

Послереакторные исследования проводились на образцах графита из крупногабаритных блоков после облучения в реакторах БОР-60 и СМ-3 АО «ГНЦ НИИАР» в широком диапазоне температур (от 400 до 1200 °С) и флюенса нейтронов (E>0,18 МэВ) $(2 \div 10) \times 10^{21}$ $см^{-2}$.

На рисунке 18 представлена общая тенденция зависимости средних значений предела прочности при растяжении (без анализа зависимости от флюенса) образцов графита из крупногабаритных блоков после облучения от температуры испытаний.



м

Рисунок 18- График зависимости средних значений предела прочности образцов графита из крупногабаритных блоков после облучения от температуры испытаний

Как показали результаты послереакторных исследований, с увеличением температуры испытаний характеристики прочностных свойств материала, независимо от направления вырезки образцов, имеют устойчивую тенденцию к росту. Так в интервале температур от комнатной (без нагрева) до 1600 °С значения предела прочности образцов графита возрастают в среднем на (41÷44) %: с (55±6) МПа до (79±8) МПа в поперечном (перпендикулярном) направлении и с (56±6) МПа до (78±8) МПа - в продольном (параллельном) направлении.

Таким образом, температура испытаний, также, как и в исходном состоянии, оказывает существенное влияние на прочностные характеристики материала графита после облучения. Проведенные исследования показали изотропность исследуемого материала: направление вырезки образцов не оказывает заметного влияния на прочность графита из крупногабаритных блоков. Разница в значениях предела прочности образцов, вырезанных в разных направлениях, не превышает ошибки определения данного метода.

После облучения происходит увеличение предела прочности при растяжении образцов графита в сравнении с исходным состоянием

Работа выполнена в рамках НИОКР по заказу АО «Концерн Росэнергоатом».

Барсанова С.В., Евсеев М.В., Нежданов А.Г., Карагерги Р.П., Лютикова М.С., Ладейщиков К.М.

Реакторные испытания и послереакторные исследования углерод-углеродных композиционных материалов и их клеевых соединений для АЭТС с ВТГР

С 2021 года в рамках Инвестиционной программы АО «Концерн Росэнергоатом» реализуется комплексная программа НИОКР по разработке технологических решений для создания атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и химико-технологической частью (АЭТС с ВТГР и ХТЧ) для производства водородсодержащих продуктов.

В рамках программы НИОКР по АЭТС с ВТГР и ХТЧ, в числе прочего, предприятиями Госкорпорации «Росатом» при участии головной научно-исследовательской организации ракетно-космической промышленности, обладающей богатым опытом в разработке композитных материалов, в том числе для аэрокосмической промышленности, ведется НИОКР по обоснованию применения углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) различных марок для использования в реакторной установке ВТГР.

Использование УУКМ, отличающегося стабильными физико-механическими свойствами в широком диапазоне температур (от 20 до 1600 °С) и высокой радиационной стойкостью (в том числе в агрессивных внешних средах), позволяет повысить эффективность реакторных установок и надежность конструкций, а также снизить массогабаритные характеристики (по сравнению с изделиями из жаростойких металлов) без потери прочностных характеристик конструкции.

В реакторе ВТГР наиболее высокие требования по механическим нагрузкам, нейтронному облучению и температурным режимам предъявляются к материалам рабочих органов систем управления и защиты (РО СУЗ). Температура РО СУЗ при нормальной эксплуатации достигает 850 °С, а в аварийных режимах температура может возрастать до 1500 °С.

Для обоснования применения углеродных материалов с 2023 года на экспериментально-исследовательской базе АО «ИРМ» проводятся реакторные испытания и послереакторные исследования образцов УУКМ и их клеевых соединений, нацеленные на изучение влияния нейтронного облучения на физико-механические и теплофизические свойства УУКМ. В качестве кандидатных материалов исследовались образцы УУКМ марки ТМ-А и образцы УУКМ марки ИПГ-К (изготовленные из углеродной ткани производства Композитного дивизиона Госкорпорации «Росатом» по иглопробивной технологии с газофазным уплотнением).

Реакторные испытания образцов УУКМ и их клеевых соединений, проводились в облучательных устройствах (далее – ОУ), разработанных конструкторским отделом и изготовленных экспериментально-механическим цехом АО «ИРМ». При облучении в ИЯР ИВВ-2М с помощью реакторного стенда РИСК осуществлялось регулирование температурного режима испытаний на номинальной мощности реактора и мониторинг за показаниями установленных датчиков температур. В зависимости от обстановки в реакторе регулирование температуры осуществлялось изменением состава инертной среды в облучательном устройстве: гелий марки 6.0 или неон марки 5.5, или смесь гелия марки 6.0 и неона марки 5.5.

Реакторные испытания различных типов образцов УУКМ и их клеевых соединений проводились в трех облучательных устройствах до максимальной температуры облучения (1200–1300) °С. Образцы в ОУ-1 испытывались до достижения флюенса быстрых нейтронов (Е>0,18 МэВ) в диапазоне от $2{,}0\times10^{21}$ нейтр./см^2 до от $3{,}0\times10^{21}$ нейтр./см^2 хотя бы для одной партии образцов, ОУ-2 и ОУ-3 – до максимального флюенса $(5\text{-}6{,}5)\times10^{21}$ нейтр./см^2.

При проведении комплексных дореакторных и послереакторных исследований образцов УУКМ и их клеевых соединений определялись формоизменение, плотность, температурный коэффициент линейного расширения, удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности, статический модуль Юнга, пределы прочности при растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге в широком диапазоне температур (от 20 °С до 1600 °С). С целью уточнения структурных изменений в результате облучения проведены исследования методами рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии образцов до- и после реакторных испытаний. Для определения механизма разрушения проведены фрактографические исследования образцов в исходном и облученном состоянии после механических испытаний.

Клеевое соединение углеродных материалов сохранило целостность при температуре облучения (692÷758) °С до флюенса $1{,}22\times10^{21}$ н/см^2. Прочность при сдвиге клеевых соединений при данных параметрах облучения выше необлученных более чем в два раза при температурах испытания до 1200 °С, а при 1600 °С клеевое соединение упрочнилось на 20 %.

На основании проведенного анализа влияния нейтронного облучения на свойства УУКМ показано, что при флюенсах облучения до $2{,}0\cdot10^{21}$ н/см^2 и при максимальных температурах облучения материалы ТМА и ИПГ-К сохранили требуемые физико-механические и теплофизические свойства. СЭМ исследования также показали, что при облучении до флюенса $2{,}0\cdot10^{21}$ н/см^2 существенных изменений микроструктуры материалов ТМА и ИПГ-К не происходит.

При максимальном флюенсе облучения до $(5\text{-}6{,}5)\times10^{21}$ нейтр./см^2 материал ТМ-А наиболее сильно подвержен деградации. По данным СЭМ исследований при максимальных флюенсах облучения происходят существенные изменения структуры УУКМ, например появление несплошностей между волокном и углеродной матрицей (рис. 19 а, б, в, г) и растрескивание углеродной матрицы (рис. 19 в, д, е), в большей степени для марки ТМ-А. Под облучением происходит трансформация элементарной ячейки и изменяется содержание структурных компонентов УУКМ марок ТМ-А и ИПГ-К.

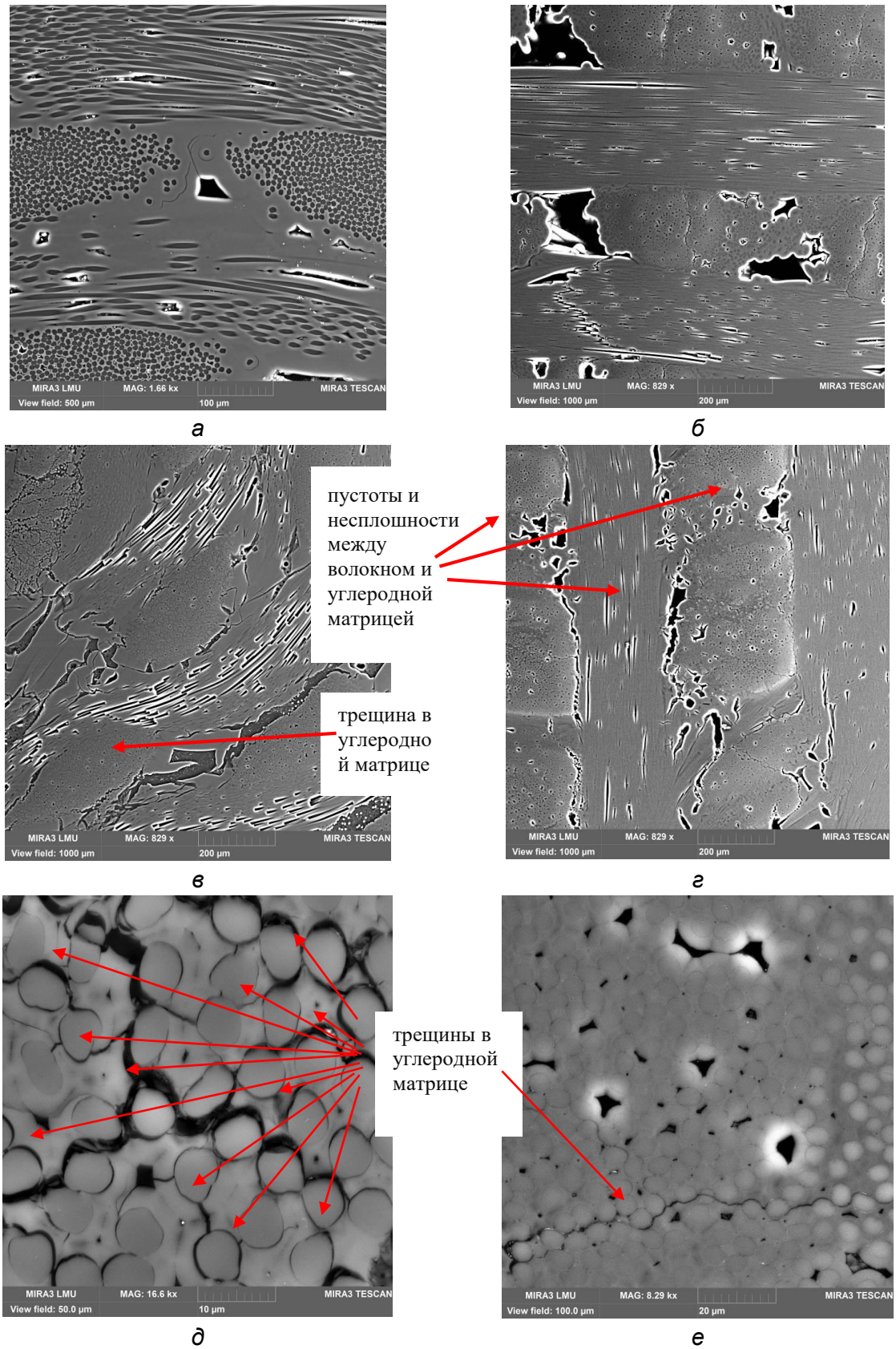


Рисунок 19 – Структурное состояние образцов УУКМ ИПГ-К (б, г, е) и ТМ-А (а, в, д) в исходном состоянии (а, б) и после облучения до флюенса 4,5×10^{21} н/см^2, $T_{обл}$=1006 °С (в, г, д, е)

Отмечено, что при максимальном флюенсе облучения до (5-6,4)×10^{21} нейтр./см^2 УУКМ марки ИПГ-К сохраняет требуемые физико-механические и теплофизические свойства и рекомендован в качестве материала для изготовления элементов конструкции РУ ВТГР, работающих в условиях максимального флюенса и высоких температур. Актуально продолжение исследований УУКМ с целью получения дополнительных данных о влиянии температуры и флюенса облучения на физико-механические и теплофизические свойства углеродных материалов. Работа выполнена в рамках НИОКР по заказу АО «Концерн Росэнергоатом».

Барсанова С.В., Литовченко В. Ю., Ротман Д. Н., Ладейщиков К.М., Карагерги Р.П., Нежданов А.Г., Лютикова М.С., Голосов О.А., Хвостов С. С., Пастухов В.И., Цыгвинцев В.А., Яркова С.В., Ярков В.Ю.

Реакторные испытания и послереакторные исследования углеродных материалов для АЭТС

В настоящее время в рамках разработки реакторной установки ВТГР (Главный конструктор – АО «ОКБМ Африкантов») для некоторых элементов оборудования, работающих в условиях нейтронного облучения, в качестве перспективного конструкционного материала рассматривается углерод-углеродный композиционный материал (далее – УУКМ). Использование УУКМ обусловлено высокой жаропрочностью, жесткостью и коррозионной стойкостью в инертных средах при температурах до 2000 ºС.

В АО «ИРМ» в период с 2023 по 2025 года проводится научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа по изучению влияния нейтронного облучения на физико-механические и теплофизические свойств УУКМ. Полученные комплексные данные послереакторных исследований углеродных материалов после облучения до проектного флюенса будут использованы при разработке материалов проекта атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (ВТГР) для производства водорода.

В 2024 году проведены реакторные испытания углеродных материалов марок ТМ-А и ИПГ-К в реакторе ИВВ-2М. Достигнут флюенс нейтронов (E ≥ 0,18 МэВ) 2,5·10^{21} см$^{-2}$ при максимальной температуре облучения (1200–1300) °С. После облучения проведены послереакторные исследования с определением ряда характеристик, включая формоизменение углеродных материалов. Завершить начатый цикл реакторных испытаний с достижением флюенса нейтронов (E ≥ 0,18 МэВ) ~ 5·10^{21} см$^{-2}$, а также послереакторных исследований облученных образцов углеродных материалов выполнены в 2025 г.

Работа входит в комплекс НИОКР, реализуемых в рамках инвестиционного проекта АО «Концерн Росэнергоатом» «Разработка технологий атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода».

Барсанова С.В., Литовченко В. Ю.,Шабельников Е.В., Ротман Д. Н., Полозов К.В.,Ладейщиков К.М., Карагерги Р.П., Нежданов А.Г., Лютикова М.С., Лапин Ю. В., Хвостов С. С.

Испытания и исследования ядерного топлива для ядерных реакторов различного типа: Определение выхода инертных газов из облученных таблеток UO2 и МОКС

В рамках приоритетного направления научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом» «Развитие современной ядерной энергетики на базе технологии ВВЭР» АО «ИРМ» и АО «ТВЭЛ» в период 2025-2030 годов реализует Программу НИОКР для обоснования проектных решений по компонентам активных зон реакторных установок ВВЭР-С-600 и ВВЭР-600 (реакторы средней мощности) с ТВС, содержащими уран-плутониевое (МОКС) топливо.

Существующие расчетные коды учитывают зависимость от температуры интенсивности выхода продуктов деления (ПД), включая инертные радиоактивнее газы (ИРГ), из штатного оксидного уранового топлива ВВЭР (UO_2) под оболочку твэлов. Для валидации расчетных кодов применительно к МОКС-топливу необходимы сравнительные экспериментальные исследования влияния параметров облучения на выход продуктов деления из топлива по результатам измерений скорости выхода ИРГ из UO_2 и МОКС-топлива под облучением, а также по результатам дореакторных и послереакторных исследований.

Для достижения поставленной цели в 2025 году проведены следующие мероприятия:

1.разработана конструкция экспериментального устройства (ЭУ) и экспериментального твэла;

2.выполнен нейтронно-физический и теплофизический расчеты ЭУ;

3.разработана новая схема модернизированного стенда РИСК-М;

4.начата работа по модернизации стенда с целью расширения его возможностей.

Конструкция ЭУ (рис.20 и 21) подразумевает, по достижении заданных параметров облучения, возможность удаления каждой отдельной ампулы, без нарушения работоспособности всего остального ЭУ.

Нейтронно-физическим и теплофизическим расчетами (рис. 22 и 23) подтверждена возможность проведения реакторного эксперимента с поддержанием стабильных значений температуры при испытаниях в условиях нормальной эксплуатации (1200°С) и достижение заданных параметров при испытаниях в условиях нарушения нормальной эксплуатации (до 1800°С).



Рисунок 20 – 3D модель 4-х ампульного экспериментального устройства

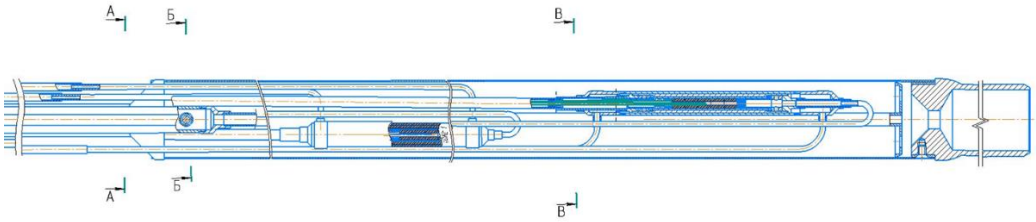


Рисунок 21 – Эскиз экспериментального устройства

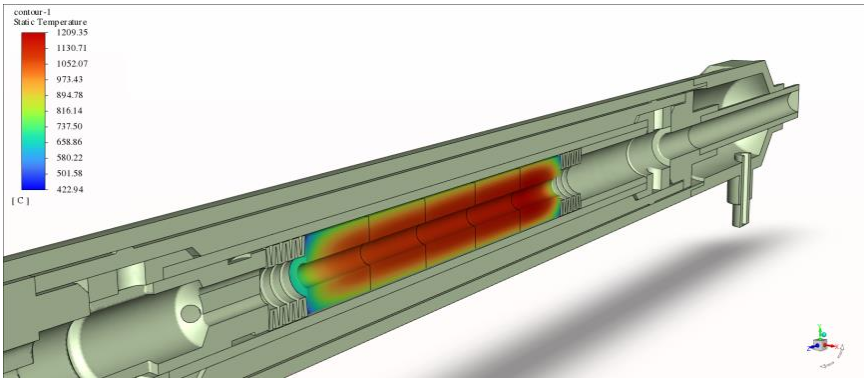


Рисунок 22 – Нейтронно-физические и теплофизические расчеты стабильного поддержания температуры в 1200 °С в центре топливного столба на 100% гелии

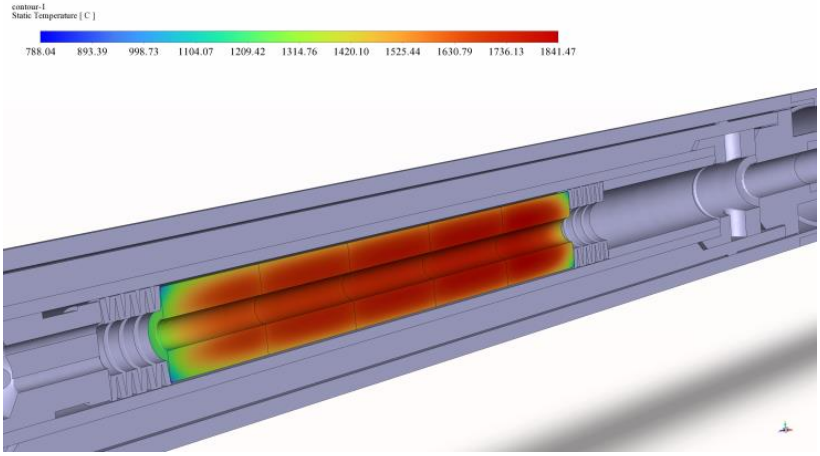


Рисунок 23 – Нейтронно-физические и теплофизические расчеты стабильного поддержания температуры в 1800 °С в центре топливного столба на 100% неоне

Вторично-ионный масс-спектрометрический контроль концентрации лантаноида в составе бор-натрий-цинковой стекломатрицы

Исследовались образцы бор-натрий-цинковых стёкол, легированных элементом лантаноидной группы (La, Ce, Pr, Nd, Eu, Dy, Er).

Элементный состав образцов имел общую формулу, % масс.:

$$(70-x)B_2O_3+15Na_2O+15ZnO+xL, \quad (1)$$

где x*L* – концентрация лантаноида (*L*) в диапазоне от 0,5 до 6 % масс.

Образцы имели форму слитков диаметром и толщиной не более 25 и 10 мм соответственно.

Целью работы являлось получение библиотеки масс-спектров образцов B-Na-Zn-стекломатрицы с различными лантаноидами и полуколичественный анализ концентрации последних на предмет соответствия паспортным значениям изготовителя стекла.

Изотопный анализ (по 3 спектра с каждого образца) проводился на квадрупольном вторично-ионном масс-спектрометре (ВИМС) марки *Hiden MAXIM Versatile SIMS Workstation* (Англия) в спектре вторичных положительных ионов в диапазоне 4–190 а.е.м., полученных распылением твердой поверхности стекла первичным пучком ионов Ar^+ силой тока 90 нА и энергией 2 кэВ. Шаг сканирования составлял 0,01 а.е.м. Вакуумное разрежение аналитической камеры составляло не более $2x10^{-6}$ мм рт. ст. Нейтрализацию положительного заряда поверхности, образующегося на непроводящей электричество цели, выполняли широким пучком электронов с энергией 500 эВ и силой тока 2,3 А. Диаметр зоны анализа (кратера) не превышал 0,15 мм.

Механическая обработка поверхности образцов перед анализом не проводилась. Очистка поверхности выполнялась протиркой этиловым спиртом. Предварительная ионная очистка поверхности первичным пучком в области анализа не проводилась.

Без наличия эталонных образцов результаты ВИМС-анализа носили полуколичественный характер и характеризовали наружный слой поверхности толщиной менее 1 мкм. Анализ концентрации лантаноидов выполнен по аналитическим изотопам ^{139}La, ^{140}Ce, ^{141}Pr, ^{142}Nd, ^{153}Eu, ^{164}Dy, ^{166}Er на основе следующих допущений:

— интенсивность ионного сигнала пропорциональна концентрации лантаноида;

— интенсивность основного матричного изотопа (^{10}B) в пределах концентраций соединения B_2O_3 от 64 до 69,5 %масс. в шихте стекломатериала определяется только топографическим рельефом, вследствие чего производится нормирование спектров всех образцов относительно фиксированного значения интенсивности (4,8E+06 имп.) для ^{10}B;

— влияние топографического эффекта на аналитические сигналы лантаноида и бора одинаково, поэтому аналитический сигнал лантаноида нормируется по сигналу ^{10}B;

— матричный эффект в пределах изменений концентраций конкретного лантаноида отсутствует.

Порядок полуколичественного анализа в условиях отсутствия стандартных образцов стекломатериала следующий:

— расчет коэффициента нормирования Кнорм, как отношение значения 4,8E+06 к максимуму интенсивности 10B-изотопа I(10B) в конкретном спектре образца;

— умножение максимума интенсивности аналитического изотопа лантаноида I(L) на коэффициент нормирования и усреднение результата Ī(L) в серии трёх спектров;

— выбор в каждой группе стекломатериала достоверного образца, являющегося опорным (с минимальным или максимальным значением концентрации лантаноида, заданной при выплавке) для пропорционального расчета концентраций лантаноида для остальных образцов партии;

— расчет фактической концентрации лантаноида относительно опорного образца:

$$C(L) = C_{пасп} \times \frac{I_x}{I_{опор}}, \quad (2)$$

где $C_{пасп}$ − паспортная концентрация лантаноида для опорного образца, % масс.;

I_x – нормированная интенсивность аналитического изотопа лантаноида для образца партии, имп.;

$I_{опор}$ – средняя нормированная интенсивность аналитического изотопа лантаноида для опорного образца с концентрацией $C_{пасп}$, имп.

Результаты контроля концентраций лантаноида на соответствие заявленному в паспорте значению для каждой из групп стекломатериалов приведены в таблице 4.

На основании выполненного контроля подтверждена принципиальная возможность полуколичественного анализа методом ВИМС концентрации лантаноидов в стекломатрице даже при отсутствии стандартных образцов. При этом относительное отклонение измеренной концентрации от паспортного значения составило от 10 до 20 %. Установлено, что отдельные образцы в исследованных партиях стекломатериалов частично или полностью не соответствуют паспортным значениям по заявленной концентрации лантаноида. Причины возникновения обнаруженных несоответствий (нарушения режима плавки, объемная неоднородность, ошибка маркировки образцов и пр.) не входят в рамки задач проведенного исследования.

Таблица 4 - Контрольные значения концентрации лантаноида в стекле, масс. %

Лантаноид	Паспортная концентрация	Контрольное значение	Примечание
La	**0,9**	Не измерялось	Опорное значение
	1,7	1,3±0,1	-
	2,6	2,4±0,1	-
	3,4	2,1±0,3	Ниже паспортного значения
	4,3	3,4±0,3	Ниже паспортного значения
	5,1	5,1±0,5	-
Ce	0,8	2,0±0,2	Несоответствие паспорту
	1,6	1,9±0,1	-
	2,4	1,4±0,1	Несоответствие паспорту
	3,3	4,0±0,4	-
	4,1	3,3±0,2	Ниже паспортного значения
	4,9	Не измерялось	Опорное значение
Pr	0,9	4,1±0,6	Несоответствие паспорту
	1,7	2,4±0,8	-
	2,6	2,7±0,2	-
	3,4	6,4±1,0	Несоответствие паспорту
	4,3	2,6±0,2	Несоответствие паспорту
	5,1	Не измерялось	Опорное значение
Er	**0,4**	Не измерялось	Опорное значение
	1,7	1,4±0,2	-
Eu	**0,4**	Не измерялось	Опорное значение
	0,9	0,9±0,2	-
	1,3	1,6±0,1	-
	1,7	1,2±0,1	Ниже паспортного значения
	2,2	1,0±0,1	Несоответствие паспорту
	2,6	2,1±0,2	-
Nd	**0,9**	Не измерялось	Опорное значение
	1,7	2,0±0,1	-
	3,4	6,6±0,6	Несоответствие паспорту
	4,3	0,2±0,1	Несоответствие паспорту
	5,1	0,1±0,1	Несоответствие паспорту
Dy	0,4	1,5±1,0	Несоответствие паспорту
	0,9	1,3±0,1	-
	1,3	1,4±0,1	-
	1,7	1,1±0,1	Ниже паспортного значения
	2,2	Не измерялось	Опорное значение

Е.А. Кинёв, А.А. Зырянова

Результаты послереакторных исследований канала СУЗ РБМК-1000 после 40 лет эксплуатации, выполненные в 2025 году

Обоснование работоспособности каналов СУЗ реакторов РБМК-1000, которые работают за пределами назначенного срока службы (30 лет), является одной из задач при продления срока эксплуатации энергоблоков.

По результатам последних послереакторных исследований в циркониевых частях каналов зарегистрировано повышенное содержание водорода, а также наличие гидридных скоплений типа «блистеров» в материале труб и ниппелях переходников «сталь-цирконий» каналов СУЗ.

После этого, для изучения причин и степени наводороживания различных зон канала была усовершенствована методическая база послереакторных исследований. В частности, введение измерений деформации продольных образцов со сварным швом позволило выявить наличие остаточных напряжений, а оптимизация схемы разделки участка на образцы определить, что в максимальной степени наводороживание происходит в зоне термического влияния нижнего электронно-лучевого сварного соединения.

Для обоснования необходимого ресурса каналов СУЗ базовой исходной информацией являются результаты расширенных послереакторных исследований каналов, извлеченных из действующих реакторов.

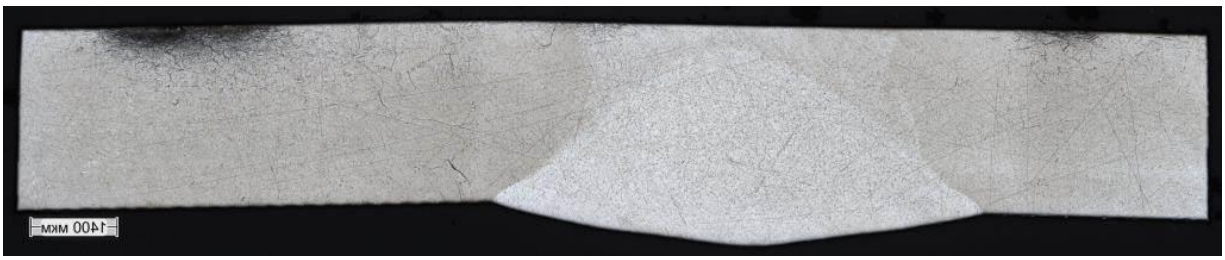
В рамках выполнения Регламента РГ 1.1.3.21.1670-2019 «Эксплуатационный контроль технологических каналов, каналов системы управления и защиты и графитовой кладки реакторов РБМК-1000 в период дополнительного срока эксплуатации энергоблоков» и Программы ПРГ 1.2.2.15.015.061-2025 «Регламентный послереакторный контроль в защитных камерах технологических каналов и каналов СУЗ, извлекаемых из реакторов РБМК-1000 на завершающем этапе эксплуатации энергоблоков» в 2025 году выполнены послереакторные исследования участка канала СУЗ с нижним переходником, примыкающим ЭЛСС и циркониевой трубой.

Канал СУЗ эксплуатировался в реакторе 1-го энергоблока СмАЭС в течение 40 лет. Цель работы – получение информации по техническому состоянию и свойствам материалов канала СУЗ после эксплуатации в условиях наводороживания циркониевых частей каналов.

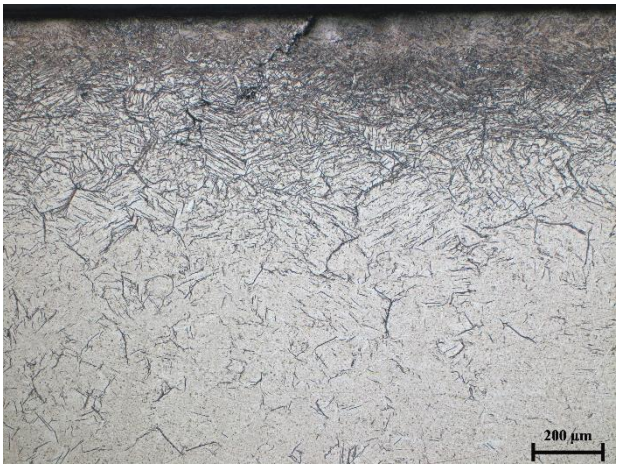
Визуальный осмотр участка канала, состоящего из нижнего переходника «сталь-цирконий» и примыкающего к нему электронно-лучевому соединению, не выявил дефектов, препятствующих эксплуатации канала.

Переходник «сталь-цирконий» сохранил целостность внутреннего стыка, Наружный стык раскрыт (что является допустимым), радиальных трещин в ниппеле не обнаружено.

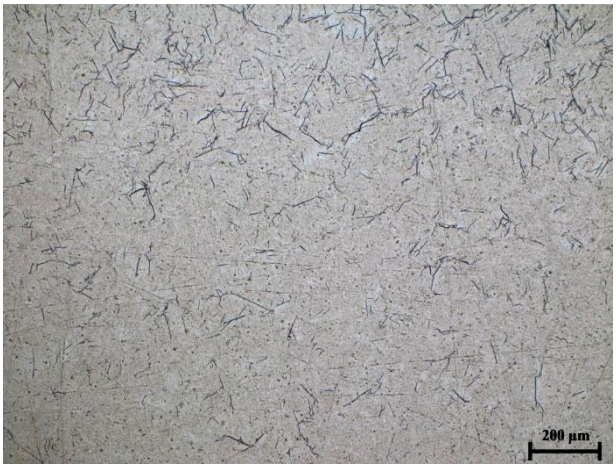
Результаты исследований повреждения гидридами циркониевой части участка канала в зоне электронно-лучевой сварки приведены на рисунке 24. Наблюдаются блистеры, максимальная протяженность которых не превышает 2,44 мм, а глубина – 0,20 мм. От вершины блистеров наблюдаются гидридные цепочки максимальной протяженностью на металлографических шлифах до 0,69 мм. Минимальная локальная остаточная толщина пластичного металла («живое сечение») составляет 2,18 мм.



а



б



в

Рисунок 24 – Гидриды на участке канала СУЗ в зоне шва ЭЛСС, общий вид (а), блистер (б), гидриды в центральных слоях под блистером (в)

Содержание водорода в отдельных пробах (с возможным попаданием блистеров) циркониевых частей участка канала колеблется: в зоне ниппеля от 34 до 125 ppm; в зоне ЭЛСС от 31 до 394 ppm; в зоне трубы, примыкающей к ЭЛСС от 10 до 30 ppm.

Кратковременные механические свойства материала исследованного участка канала СУЗ находятся на уровне ранее исследованных.

Полученные результаты показывают, что, несмотря на гидридные повреждения, исследованный канал сохранил свою работоспособность.

АО «ИРМ»: Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Вельмогин Д.Н., Нежданов А.Г., Ярков В.Ю., Самедов В.К., Старицын С.В., Соловьева С.В.
АО «НИКИЭТ»: Балдин Д.В., Слободчиков А.В., Яцковец С.Г. Бакулин Д.В.
Филиал АО «Концерн РЭА» «Смоленская атомная станция» (Смоленская АЭС): Карпинский А.В., Леонов А.И.

Влияние наводороживания на структурно-фазовое состояние сплава Zr-2.5Nb

Циркониевые сплавы нашли широкое применение в атомной энергетике. Однако применение сплавов на основе циркония ограничивается рядом проблем, возникающих в процессе их эксплуатации в условиях активной зоны реакторов водо-водяного или канального типов. Одной из ключевых проблем является наводороживание и образование гидридных фаз (γ-ZrH, δ- ZrH1,66, ε-ZrH2, ζ-Zr2H), приводящих к охрупчиванию материала. Изучение особенностей формирования гидридов в зависимости от структуры сплава Zr-2.5Nb, а также

влияние сформированных гидридных фаз на разрушение материала является актуальным.

В качестве материала исследования были выбраны образцы сплава Zr-2.5Nb, вырезанные из участков канала системы и управления защитой (КСУЗ) после длительной эксплуатации в условиях активной зоны РБМК-1000: циркониевая труба (Тр), а также зона термического влияния (ЗТВ) вблизи и на отдалении от электронно-лучевого сварного соединения. Электронно-микроскопические исследования проводились на установке TESCAN Mira3. Для РФА использовался дифрактометр D8 ADVANCE (Cu Kα).

Для участков трубы структура сплава Zr-2.5Nb характеризовалась неоднородными по размерам зёрнами α-фазы, вытянутыми вдоль оси трубы (рис. 25 а, б). Наблюдались мелкодисперсные выделения β-Nb по границам и внутри зёрен α-фазы (рис. 25 а). По границам и в теле зёрен α-фазы зафиксировано наличие γ-гидридов, формирующих единичные пластины или цепочки (рис.25 а,б). Часть гидридов пересекает межзёренные границы, не меняя своей геометрической направленности (рис. 25 а, б, в). Внутри гидридов наблюдается сложное строение с несколькими ориентациями, разделёнными высокоугловыми границами (рис. 25 в). При переходе из зерна в зерно ориентации γ-гидридов меняются дискретно, что подтверждает наличие ориентационных соотношений между матрицей и гидридами (рис. 25 в).

На участках ЗТВ, непосредственно контактировавших с расплавом материала сварного соединения, после быстрого охлаждения из β-области сформировалась мартенситная структура α′-фазы в виде крупных пластин и мелких ламелей (рис. 25 г, д). Наблюдаются колонии с двойниковыми границами (рис. 25 д). γ-гидриды округлой и реечной форм образуются на высокоугловых границах α′/α′ и двойниковых границах (рис. 25 е).

В областях ЗТВ на отдалении от сварного соединения наблюдается структура «корзиночного плетения» – пакеты α-фазы в виде ламелей близких ориентаций, формирующих пакеты, и дисперсные выделения β-Zr-фазы по границам (рис. 25 ж, и). γ-гидриды зарождаются на границах пакетов и пластин, а также на бывших границах β-зёрен (рисунок 25 ж, и). Рост гидридов сопровождается замещением ламелей α-фазы с сохранением выделений β-фазы. Внутренние объемы гидридов характеризуются мелко реечной структурой (рис. 25 к).

РФА показал, что на всех исследованных участках зафиксировано наличие γ-гидридов Наибольшая концентрация γ-гидрида зафиксирована в ЗТВ. В этих областях наблюдается также δ-гидрид.

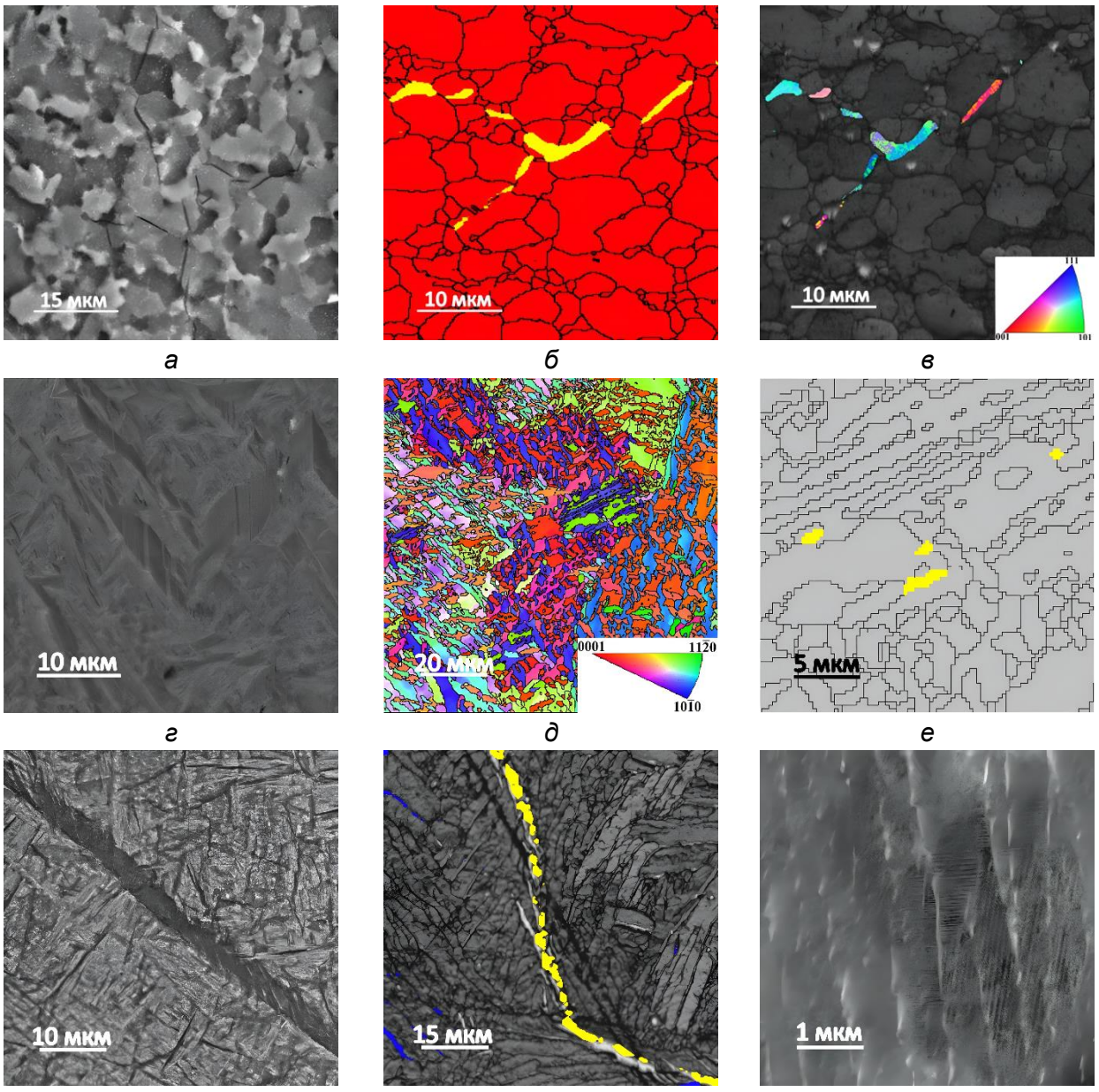


Рисунок 25 – Структурно-фазовое состояние образцов сплава Zr-2.5Nb, вырезанных из участков канала СУЗ, прошедшего длительную эксплуатацию в условиях активной зоны РБМК-1000: а, б, в – участок циркониевой трубы; г, д, е – ЗТВ, непосредственно контактировавшая с расплавом материала электронно-лучевого сварного соединения; ж, и, к – ЗТВ, расположенная на отдалении от расплава материала электронно-лучевого сварного соединения; а – цепочки гидридов на границах и в объеме зерна α-фазы; б – фазовая карта EBSD (красный цвет – α-фаза, желтый – γ-гидрид); в – ориентационная карта γ-гидрида в направлении параллельном оси трубы; г – мартенситная структура α'-фазы; д – ориентационная карта α'-фазы в направлении параллельном оси трубы; е – фазовая карта EBSD (серый цвет – α'-фаза, желтый – γ-гидрид); ж – пластинчатая структура α-фазы, а также цепочки гидридов по границам α-фазы; и – фазовая карта EBSD (контраст интенсивности ДОЭ (Band contrast)) – α-фаза, желтый цвет – γ-гидрид, синий – β-фаза); к – реечная структура во внутреннем объеме гидридных пластин

Механические испытания образцов канала СУЗ, вырезанных из указанных выше участков, выявили снижение пластических свойств сплава Zr-2.5Nb. Для

анализа причин деградации пластических свойств материала, проведены фрактографические исследования изломов образцов, которые показали наличие хрупкого разрушения с характерными морфологическими особенностями фасеток скола (рис. 26). На образцах, вырезанных из циркониевой трубы, наблюдаются плоские фасетки скола (рис. 26 а, б). Для всех области ЗТВ зафиксирован реечный рельеф поверхности излома с проявлением границ реек и пакетов α-фазы (рис. 26 в, г).

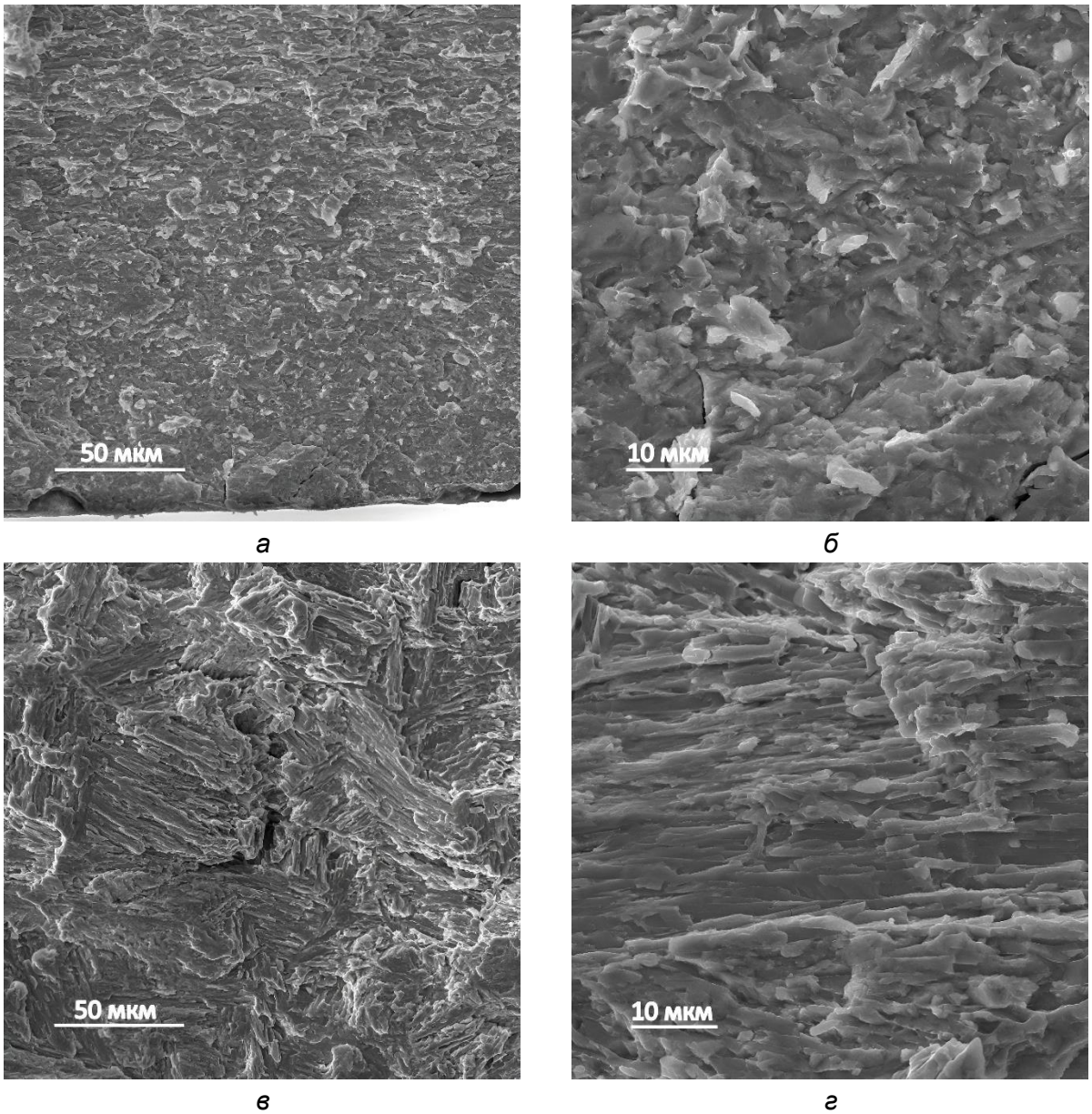


Рисунок 26 – Поверхности хрупкого разрушения в областях трубы (а, б) и ЗТВ (в,г) (вторичные электроны): а, б – плоские фасетки; в, г – реечный рельеф

При длительном низкотемпературном нейтронном облучении в водном теплоносителе в сплаве Zr-2.5Nb образуются гидридные фазы, вызывающие охрупчивание. В случае структуры сплава, состоящей из зёрен α-фазы с небольшим количеством β-Nb, местами зарождения гидридов являются внутренние объёмы зёрен и их границы. При пластинчатой (мартенситной) структуре гидриды преимущественно зарождаются на межпластинчатых и межпакетных границах α/α, а также на границах бывшей высокотемпературной β-фазы.

Методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), включая дифракцию обратно рассеянных электронов (ДОЭ/EBSD), и рентгенофазового анализа (РФА), изучено структурное состояние сплава Zr-2.5Nb после длительного низкотемпературного нейтронного облучения в среде водного теплоносителя. Формирование гидридов γ(ZrH) на границах или в теле кристаллитов α-фазы в виде отдельных пластин, цепочек или скоплений зависит от микроструктуры и фазового состава циркониевого сплава. Во всех случаях наблюдаются кристаллогеометрические ориентационные соотношения с матрицей. Показано, что разрушение сплава с высокой концентрацией гидридов происходит хрупко с характерными фасетками скола.

В.Ю. Ярков, В.И. Пастухов, С.А. Аверин,
В.А. Цыгвинцев, С.В. Соловьева

Нейтронографические исследования продуктов оксидного осаждения ДМ и РЗМ из хлоридных расплавов

Развитие ядерной энергетики напрямую зависит от решения вопросов переработки облученного ядерного топлива, что обусловлено необходимостью эффективного использования делящихся материалов и безопасного обращения с радиоактивными отходами, включая их концентрацию и изолированное захоронение. Наиболее перспективной моделью будущей ядерной энергетики представляется параллельное использование оптимизированного набора реакторов на тепловых и быстрых нейтронах, где последние обеспечивают первых ядерным топливом. Реализация таких схем возможна только при организации замкнутого топливного цикла, предполагающего переработку ОЯТ с выделением и повторным использованием остаточных и наработанных делящихся элементов. При этом ядерное топливо планируется применять в виде нитридных (СНУП-топливо) и оксидных (МОКС-топливо) композиций. Успех данных программ требует развития технологий обращения с такими материалами, включая разработку пирохимических методов переработки смешанного уран-плутониевого нитридного ОЯТ. Ключевым этапом указанных технологий является осаждение актинидов и редкоземельных элементов из солевых расплавов в виде оксидов и оксифторидов. Достоверное определение фазового состава образующихся соединений критически важно для точного расчета технологических параметров, минимизации потерь делящихся материалов и обеспечения радиационной безопасности, что обосновывает промышленную реализуемость процесса в соответствии с нормативными требованиями.

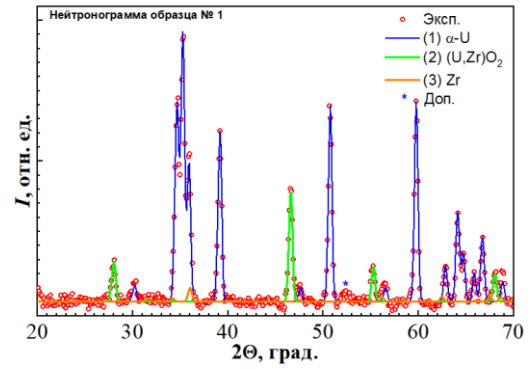
Метод дифракции нейтронов является одним из наиболее эффективных способов изучения кристаллической структуры и фазового анализа состава сложных композиционных топливных материалов. Высокая проникающая способность нейтронов позволяет упаковывать исследуемые образцы в герметичные ванадиевые контейнеры, исключающие контакт содержащихся в них материалов и композиций с атмосферой в ходе проведения эксперимента. Нерегулярный характер зависимости сечений рассеяния от атомного номера элементов создает при рассеянии нейтронов соответствующий контраст и

позволяет легко позиционировать легкие элементы на фоне тяжелых, что весьма затруднительно для рентгеновских лучей. Это имеет принципиальное значение для исследования фазового состава и структурных свойств топливных материалов, состоящих из тяжелых атомов урана и легких атомов кислорода или азота.

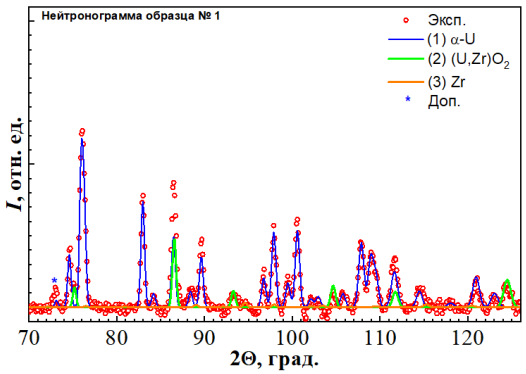
Авторами проведены нейтрон-дифракционные исследования фазового состава и структурных свойств ряда образцов модельного ОЯТ (таблица 5) на основе механической смеси диоксида урана с оксидом циркония и оксидами церия с добавками меди или цинка в исходном состоянии и после различных стадий их пирохимической переработки. Подготовленные в ИВТЭ УрО РАН образцы модельного ОЯТ были упакованы в специальные герметичные ванадиевые контейнеры. Измерения нейтронограмм выполнены на дифрактометре высокого разрешения Д-7а исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М. Анализ экспериментальных данных выполнен с использованием полнопрофильного метода Ритвельда в пакете программ *FullProf Suite*. Пример полученной экспериментальной нейтронограммы металлизированного образца № 1 за вычетом фонового рассеяния и расчетных вкладов проиндексированных фаз: α-U (1), $(U,Zr)O_2$ (2) и Zr (3) представлен на рисунке 27.

Красные точки – эксперимент за вычетом фона, синяя линия – вклад в модельный профиль основной фазы α-U (1), зеленая линия – вклад фазы твердого раствора $(U,Zr)O_2$ на основе UO_2 (2), оранжевая линия – вклад фазы Zr (3), звездочки – дополнительные пики;

а – в интервале углов рассеяния нейтронов от 20° до 70°; б – в интервале от 70° до 126°



а



б

Рисунок 27 – Вклады в результат уточнения по методу Ритвельда нейтронограммы полученной на металлизированном образце (номинальной смеси диоксида урана 95 мас.% и диоксида циркония 5 мас.%) отмывки и высокотемпературной вакуумной отгонки электролита

Нейтрон-дифракционный анализ семи образцов подтвердил трансформацию фазового состава на этапах пирохимической переработки модельного топлива: от диоксида до металлизированного состояния (образцы № 1, 2). Установлено, что отжиг оксидных смесей приводит к формированию твердых растворов (образцы № 3, 4 и 6), а избыток диоксида циркония при электролизе существенно снижает выход металлического урана, вдвое увеличивая долю

невосстановленной фазы. Также выполнена нейтронографическая аттестация композиций на основе нитрида урана (образцы № 5, 7).

Таблица 5 – Анализ фазового состава образцов продуктов оксидного осаждения ДМ и РЗМ из хлоридных расплавов

№	Фаза (вес %)	Группа	*a*, нм	*b*, нм	*c*, нм
1	α-U (90,0 ± 3,6)	*Cmcm*	0,28582±0,00007	0,58683±0,00014	0,49625±0,00012
	Zr (1,2 ± 0,5)	$P6_3/mmc$		0,3246 ± 0,0007	0,5197 ± 0,0021
	$(Zr,U)O_{2+x}$(8,8 ± 1,0)	*Fm*-3*m*		0,54685 ± 0,00012	
2	α-U (74,6 ± 1,7)	*Cmcm*	0,28598±0,0001	0,58696±0,0002	0,49642±0,0002
	UO_2 (22,5 ± 0,7)	*Fm*-3*m*		0,5470 ± 0,0003	
	$(Zr,U)O_{2+x}$(2,7 ± 0,2)	$P6_3/mmc$		0,3246 ± 0,0004	0,5209 ± 0,0013
3	$(U,Ce)O_2$ (98,8 ± 0,9)	*Fm*-3*m*		0,54655 ± 0,00002	
	Cu (1,2 ± 0,1)	*Fm*-3*m*		0,3619 ± 0,00016	
4	$(U,Ce)O_2$ > 97,7 вес %	*Fm*-3*m*		0,54649 ± 0,00003	
5	UO_2 (96,3 ± 1,4)	*Fm*-3*m*		0,54768 ± 0,00004	
	UN (3,7 ± 0,2)	*Fm*-3*m*		0,49174 ± 0,00009	
6	$(U,Ce)O_2$ (69,2 ± 5,3)	*Fm*-3*m*		0,5466 ± 0,0004	
	CeClO (11,6 ± 2,1)	*P*4/*nmm*		0,4088 ± 0,0007	0,6832 ± 0,0022
	R_2O_3 (19,2 ± 0,9)	*Ia*-3		1,1117 ± 0,0011	
7	UN > 98,0 вес.%	*Fm*-3*m*		0,48898 ± 0,00005	

Работа выполнена в рамках договора ИВТЭ УрО РАН с головным заказчиком АО «Прорыв» на базе Уникальной научной установки «Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ УрО РАН на реакторе ИВВ-2М».

Ю.В. Лапин, С.С. Хвостов, О.А. Голосов,
ИФМ УрО РАН: М.А. Сёмкин, А.Ф. Губкин
ИВТЭ УрО РАН: П.Н. Мушников

Разработка установки компактирования продуктов ВТО СНУП ОЯТ для работы в горячей радиационно-защитной камере

Одним из актуальных направлений обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) является разработка пирохимической технологии переработки смешанного нитридного уран-плутониевого (далее – СНУП) ОЯТ. Для формирования таблеток после высокотемпературной обработки (далее – ВТО) СНУП ОЯТ планируется осуществлять этап компактирования. Компактирование окисленного СНУП ОЯТ относится к подготовительному этапу электрохимического восстановления, окисленного СНУП ОЯТ до металлического состояния. Для этого необходимо обеспечить достаточную плотность компактных образцов окисленного СНУП ОЯТ. С целью перевода порошка в шашки рассматривается последовательные операции прессования и спекания.

Ввиду высокой активности окисленного СНУП ОЯТ все работы должны проводиться в радиационно-защитных камерах, что накладывает определенные ограничения, в частности, при использовании гидравлических систем для прессования. Поэтому наиболее перспективным считается процесс магнитно-импульсного прессования.

В 2025 году разработана рабочая конструкторская документация (далее – РКД) на установку компактирования продуктов ВТО СНУП ОЯТ (далее – Установка). Установка представляет собой систему узлов и механизмов, чья последовательность и совокупность позволяют получить плотные шашки на выходе. Компакты подлежат дальнейшей переработке на этапах пирохимической технологии.

На рисунке 28 представлен эскиз Установки. В состав Установки входят: смеситель, где происходит механическое перемешивание со связующими и спекающими добавками; дозатор пресс-порошка, из которого последний порционно подаётся в пресс-форму; пресс-форма, входящая в состав одноосного магнитно-импульсного пресса; а также механизм извлечения шашек из пресс-формы. Одноосный магнитно-импульсный пресс помимо пресс-формы включает в себя силовую раму с катушкой сильного импульсного магнитного поля (плоский спиральный индуктор) с формирователем механического импульса силы, генератор импульсных токов на основе емкостного накопителя с блоком регулируемого зарядного напряжения и вакуумного разрядника, и систему управления.

Принцип работы Установки позволяет получать спрессованные таблетки высокой плотности при её эксплуатации в радиационно-защитной камере. Процесс компактирования реализуется за счёт механизма магнитно-импульсного пресса.

Принцип действия магнитно-импульсного пресса – “магнитный молот”, основан на ускорении массивного проводящего тела (молота) под действием давления импульсного магнитного поля, возникающего в результате взаимодействия поля с наведенными в поверхностном слое проводника вихревыми токами. При этом энергия электромагнитного поля преобразуется в кинетическую энергию молота, которая затем расходуется на уплотнение порошка при его торможении. Благодаря применению мягких импульсных волн сжатия происходит уплотнение и активация к спеканию порошков. В данных условиях оказывается

проще создавать условия для получения макроскопически однородных прессовок без трещин.

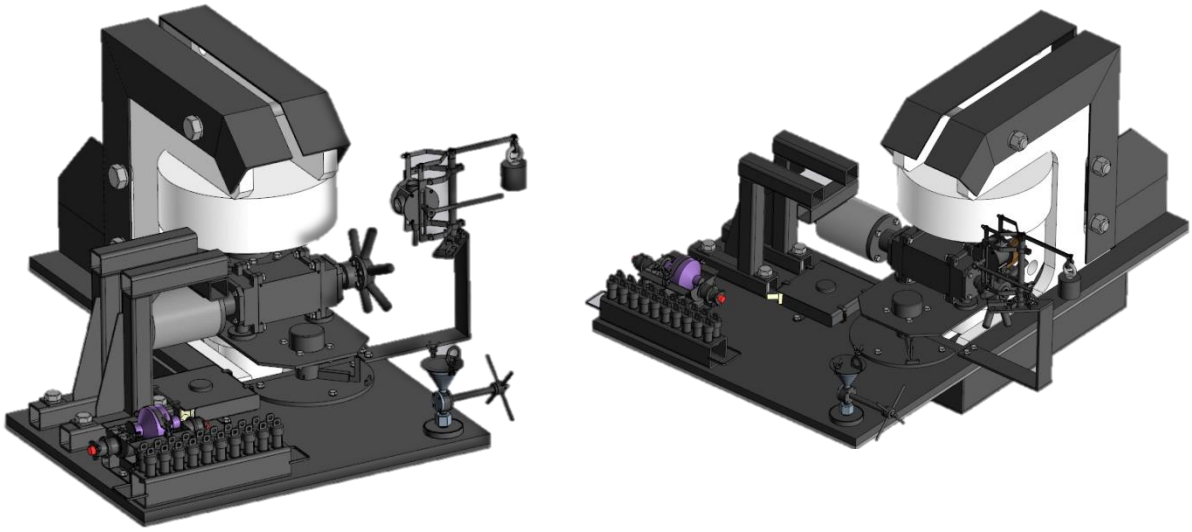


Рисунок 28 – 3D-изображение Установки компактирования продуктов ВТО СНУП ОЯТ

Впервые разработано оборудование для получения компактных образцов из окисленного порошка СНУП ОЯТ для работы в условиях радиационно-защитных камер. На основании разработанного комплекта рабочей-конструкторской документации, включая прочностные расчеты, в период 2026-2030 гг. планируется изготовление Установки и далее отработка режимов компактирования для определения оптимальных параметров процесса получения плотных шашек на МП ОДЭК при обращении с окисленным СНУП ОЯТ.

М.С. Китик, С.С. Хвостов, П.В. Борисов,
ИВТЭ УрО РАН: Ю.П. Зайков, А.В. Шишкин., Л.А. Дойникова, М. Шашков

Влияние скорости охлаждения на формирование структурно-текстурных состояний нержавеющей стали ферритно-мартенситного класса с 12 мас. % хрома

Ферритно-мартенситные стали с 9–12 % Cr перспективны для атомной энергетики благодаря стойкости к радиационному распуханию. Однако их эксплуатация ограничена температурным диапазоном 350–550 °C из-за ползучести и охрупчивания. Механические свойства таких сталей определяются структурно-текстурным состоянием, в частности — характером фазовых превращений и типом границ. Современные методы EBSD и реконструкции аустенитного зерна позволяют детально изучить эти процессы.

В исходном состоянии структура состояла из мартенсита, ~13 % δ-феррита и крупных карбонитридов (NbMo)(CN). На границах фиксировались специальные РСУ-границы (Σ3, Σ11, Σ25b и др.), характерные для мартенситного превращения. После закалки в воду и охлаждения на воздухе структура качественно сохранялась. При медленном охлаждении в печи доля δ-феррита возрастала до 20 %,

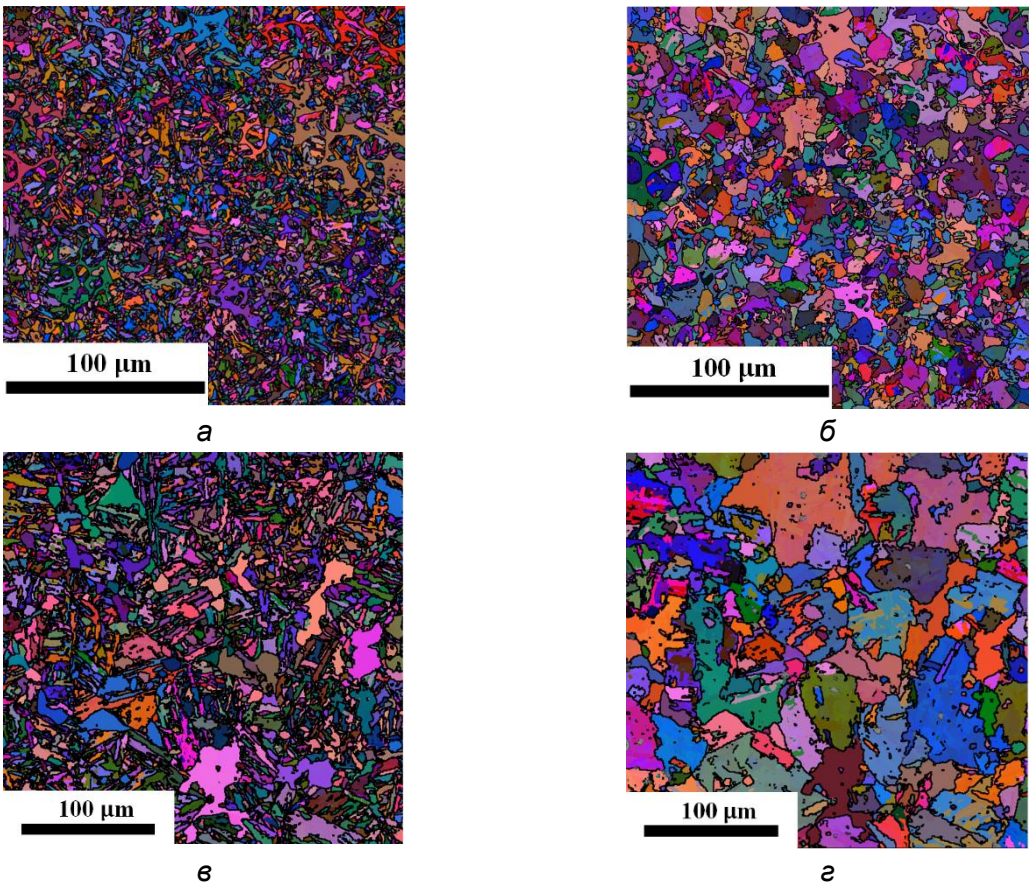
появлялись карбиды $M_{23}C_6$ и (VNb)C, а также усиливались пики границ Σ7, Σ9, Σ29b, что указывает на начало возврата.

Ключевым результатом является наблюдение структурно-текстурной наследственности. На рисунке 29а представлена карта ориентаций исходного состояния до реконструкции: видны пакеты мартенсита и зёрна δ-феррита. На рисунке 29б показана реконструированная аустенитная структура того же участка — каждое зерно δ-феррита «превращается» в отдельное аустенитное зерно. Аналогично, на рисунке 29в (охлаждение в печи, карта ориентаций до реконструкции) и рисунке 29г (реконструированная аустенитная структура) также наблюдается высокая степень соответствия. Это подтверждает, что δ-феррит является прямым участником фазовых превращений, а границы δ/γ, упорядоченные по ориентационному соотношению Курдюмова-Закса, служат центрами зарождения новой фазы. Текстурный анализ показал, что независимо от скорости охлаждения текстура материала частично воспроизводится. Реконструированный аустенит во всех случаях имеет близкие ориентировки {011}⟨111⟩–{011}⟨112⟩, что также свидетельствует о наследственности.

Установлено, что при всех скоростях охлаждения из преимущественно аустенитной области структура стали Х12НМВСФБ состоит из зерен высокотемпературного δ-феррита и областей мартенсита, а также крупных выделений (NbMo)(CN), сформировавшихся при кристаллизации, и более дисперсных выделений $M_{23}C_6$ и (VNb)C, образовавшихся при охлаждении.

Показано, что при реализации фазовых превращений в последовательности: δ+α′→δ+γ→δ+α′ в стали наблюдается структурно-текстурная наследственность, заключающаяся в частичном воспроизведении основных ориентировок ОЦК-решетки после цикла термической обработки. По-видимому, структурно-текстурная наследственность при много вариантности мартенситного превращения обусловлена зарождением новой фазы на специальных, кристаллографически обусловленных границах. При чем основным местом зарождения α′-фазы являются границы между δ-ферритом и аустенитом при охлаждении.

Материал подготовлен на основе статьи: Журнала МиТОМ (Металловедение и Термическая обработка Металлов) 2025 года выпуска 1. Название статьи: «Влияние скорости охлаждения на формирование структурно-текстурных состояний нержавеющей стали ферритно-мартенситного класса с 12 % (масс.) хрома»



а *б* *в* *г*

Рисунок 29 — Карты ориентаций в углах Эйлера стали ферритно-мартенситной стали в исходном состояние (а. б) и после охлаждения в печи (в, г): а, в — до реконструкции; б, г — реконструированная аустенитная структура по ориентационному соотношению Курдюмова-Закса

Пастухов В.И., Устинов А.Е., Ярков В.Ю., Соловьева С.В.
УрФУ им. Б.Н. Ельцина: Лобанов М.Л.

Испытания топлива ВТГР в номинальных и аварийных режимах

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) относятся к ядерно-энергетическим установкам Поколения IV, характеризующегося высоким уровнем естественной безопасности. Одним из основных компонентов обеспечения безопасности реакторов ВТГР является применение TRISO-топлива, представляющего собой топливный сердечник (керн) с нанесенными на него несколькими слоями защитных покрытий из пироуглерода и карбида кремния, обеспечивающими низкий уровень активности, выходящей за их пределы. В этой связи, на этапе обоснования безопасности ВТГР, возникает необходимость исследования эффективности барьерных свойств защитных покрытий топлива в условиях штатных рабочих параметров, а также при параметрах, соответствующих аварийным режимам работы.

В рамках данной тематики в АО «Институт реакторных материалов» в 2025 году были продолжены работы по экспериментальному исследованию кинетики выхода основных газообразных продуктов деления (133Xe, 135Xe, 135mXe, 138Xe, 137Xe, 139Xe, 85mKr, 88Kr, 87Kr, 89Kr, 90Kr) из образцов микротвэлов и топливных

компактов ВТГР в зависимости от температуры и глубины выгорания топлива, соответствующих режимам нормальной эксплуатации, а также аварийным режимам для реакторов типа ВТГР. Объектами исследования выступали микротвэлы на базе сердечника из UO2 с многослойным защитным покрытием типа TRISO, и топливные компакты, изготовленные АО «НИИ НПО «ЛУЧ» на лабораторном оборудовании по оптимизированной технологии на базе отечественных графитовых материалов и по актуализированным техническим требованиям.

Работы реализовывались путем проведения реакторных ампульных испытаний двух экспериментальных устройств (ЭУ) АСУ-18МТ3-1 и АСУ-18МТ3-2 в интервале номинальных (1000 – 1300 °С) и аварийных (1600 – 1700 °С) температур в исследовательской ядерной установке ИВВ-2М. Поддержание параметров и реализация пробоотбора были реализованы с помощью систем реакторного стенда «РИСК».

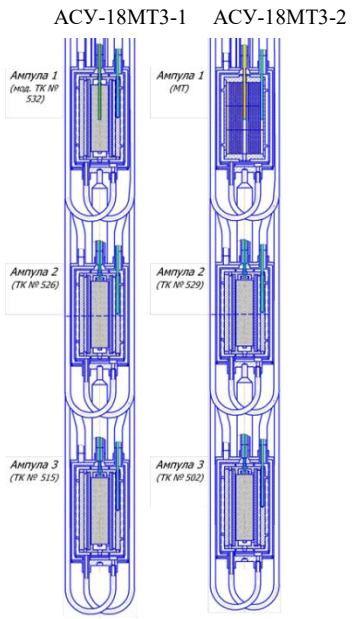


Рисунок 30 – Конструкция навесок

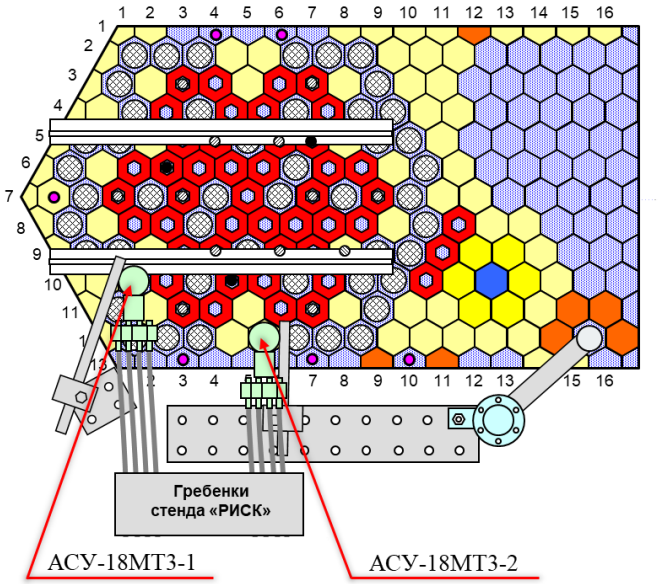


Рисунок 31 – Расположение ЭУ в ИЯР ИВВ-2М

Экспериментальная часть реакторных ампульных испытаний заключалась в периодической продувке рабочих полостей ампул гелием и последующем гамма-спектрометрическом измерении прошедшего через рабочие полости ампул газа-носителя (т.н. динамических газовых проб, ДГП) на измерительном участке газового стенда «РИСК». Изменение температурных режимов облучения исследуемых топливных образцов было реализовано за счет ступенчатого изменения соотношения между He и Ne в подаваемой в страховочные полости ампул газовой смеси. Гамма-спектрометрические измерения заключались в фиксировании измеренной Ge-детектором частоты повторения импульсов от изотопов Xe и Kr, приходящих в составе ДГП в пробоотборник. Кроме того, в рамках аварийных испытаний была реализована процедура непрерывной регистрации выхода ГПД из образцов топлива ВТГР.

В результате испытаний на этапе 2025 года получены зависимости относительной скорости выхода исследуемых газообразных продуктов деления от

выгорания и температуры топлива до выгораний на уровне 12% т.а. Относительная скорость выхода ГПД из исследуемых образцов не превысила установленных для реактора типа ВТГР значений, что позволяет сделать вывод о хорошем качестве исследуемых микротвэлов и топливных компактов.

Представленное исследование входит в комплекс НИОКР, реализуемых в рамках инвестиционного проекта АО «Концерн Росэнергоатом» «Разработка технологий атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода».

Ротман Д.Н., Литовченко В.Ю.

Расчет накопления изотопов тербия и гадолиния при облучении мишени, обогащённой по изотопу 160Gd

С 2024 года АО «ИРМ» реализует цикл работ, направленных на создание серийного производства радиоизотопа Тербий-161. Данный радиоизотоп рассматривается как перспективный бета-излучающий радионуклид, с периодом полураспада 6,96 суток и средней энергией Eβ-av = 154 кэВ. Кроме того, одновременное излучение γ-квантов с энергией 48,9 кэВ (Iγ=17,0%) и 74,6 кэВ (Iγ=10,3%) делает требий-161 подходящим для ОФЭКТ-визуализации. Фактически, его физические характеристики распада очень близки к характеристикам лютеция-177 (T1/2=6,65 суток, Eβ-av=134 кэВ, Eγ=113 кэВ (Iγ=6,17%), Eγ=208 кэВ (Iγ=10,36%)), это позволяет рассматривать тербий-161 альтернативным изотопом. Кроме того, дополнительное излучение конверсионных и Оже-электронов может повысить его терапевтический потенциал, что продемонстрировано в работах.

Тербий-161 в основном получают в ядерных реакторах путем облучения тепловыми нейтронными мишеней с высоким содержанием гадолиния-160 (обогащение свыше 97,5%), что позволяет нарабатывать значительные количества тербия-161.

Значимым каналом образования 161Tb является его образование из 160Gd (см. рисунок 32).

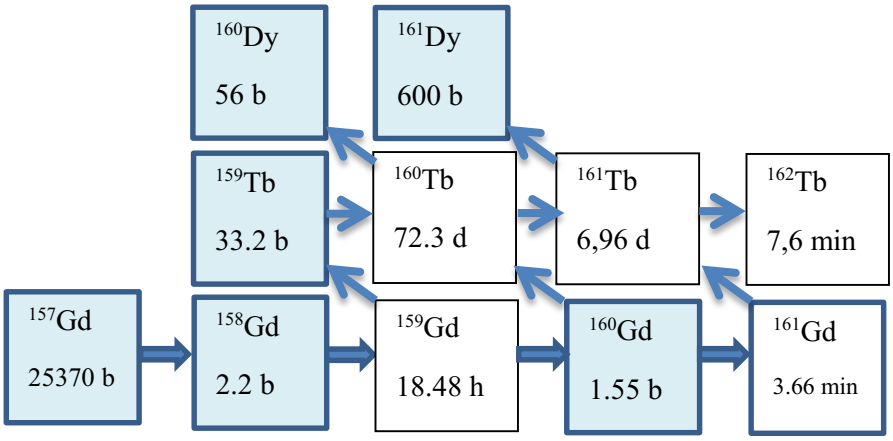


Рисунок 32 – Схема превращения изотопов в процессе облучения

Так как постоянная распада 161Gd на 7 порядков больше, чем скорость реакции 160Gd+n→161Gd, то при расчёте накопления 161Tb можно пренебречь

ступенью распада 161Gd (см. рисунок 33). В этом случае схема распада примет вид, представленный на рисунке 34.

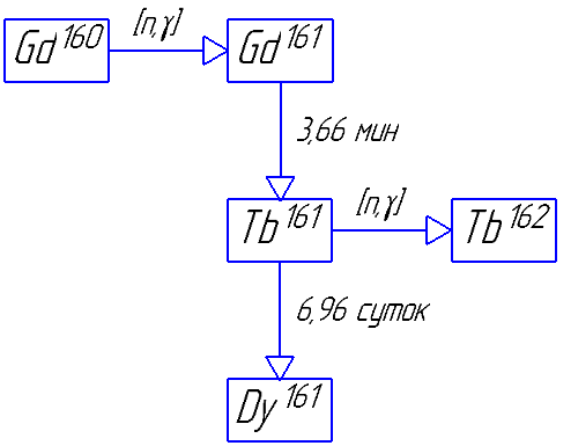


Рисунок 33 – Схема преобразования 160Gd в 161Tb

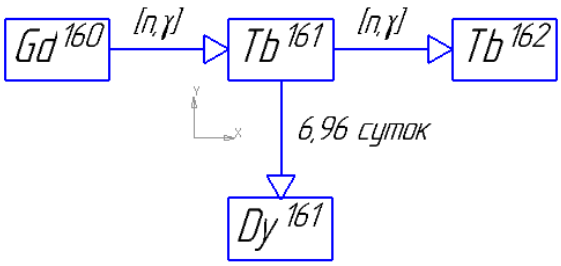


Рисунок 34 – Схема преобразования 160Gd в 161Tb без учёта образования 161Gd

В 2025 году были проведены теоретические и экспериментальные исследования по накоплению изотоп тербий в мишенях из обогащённого гадолиния-160 в потоке тепловых нейтронов реактора ИВВ2-М.

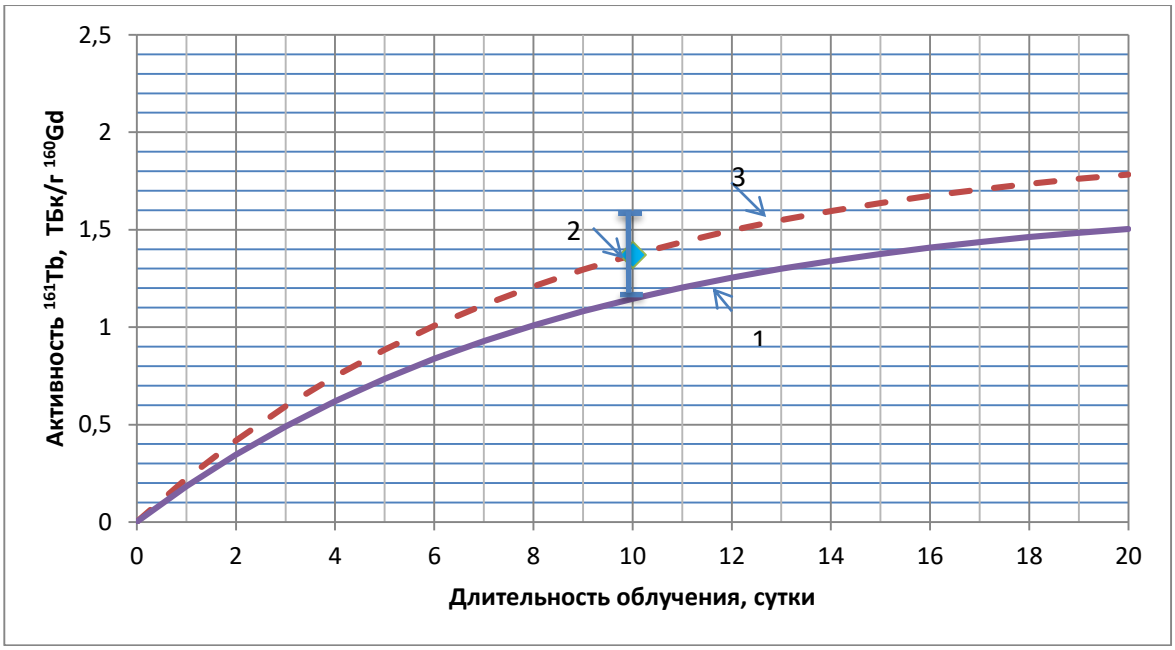


Рисунок 35 – График накопления 161Tb из 160Gd в процессе облучения: 1 – график, построенный по результатам расчётов с литературными данными по скоростям реакций; 2 – активность 161Tb, измеренная на гамма-спектрометре; 3 – график, построенный по результатам расчётов со скорректированными скоростями реакций.

На рисунке 35 представлен график накопления 161Tb в потоке тепловых нейтронов $3.34 \cdot 10^{14}$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$. Сплошной линией изображен график, построенный по результатам расчётов с использованием литературных данных по скоростями

реакций, пунктирной линией изображен график, построенный по результатам расчётов со скорректированными скоростями реакций с учетом результатов гамма-спектрометрических измерений.

На рисунке 36 представлен график накопления 160Tb в мишени содержащей 1 г 160Gd, построенный по результатам расчётов с использованием литературных значений по скоростям реакций. Так же приведено значение активности 160Tb, измеренной на гамма-спектрометре, после 10-суточного облучения.

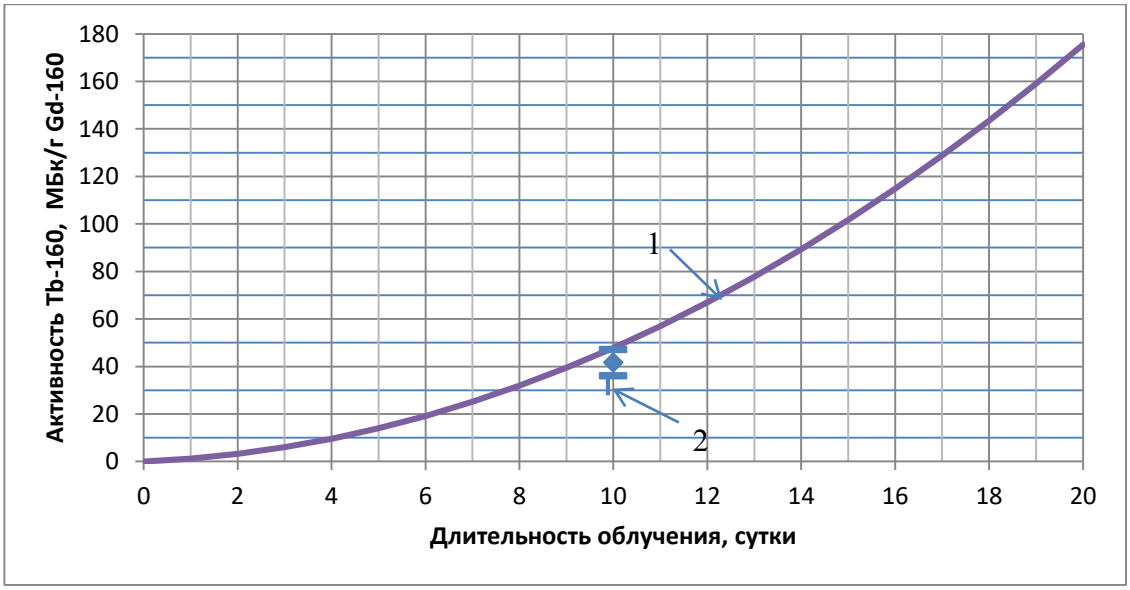


Рисунок 36 – График накопления 160Tb в мишени содержащей 1 г 160Gd: 1 – график, построенный по результатам расчётов со скоростями реакций, пересчитанными по данным технической справки; 2 – активность 160Tb, измеренная на гамма-спектрометре



Рисунок 37 - Изменение удельной активности 161Tb после 10 суток облучения

На рисунке 37 представлен график описывающий изменение удельной активности 161Tb после 10 суток облучения. Как видно из графика,

экспериментально измеренное значение удельной активности 161Tb достаточно хорошо ложится на расчетную кривую.

Важным параметром, характеризующим радионуклидную чистоту препарата, изготовленного из облучённого гадолиния, является соотношение активностей 160Tb и 161Tb. На рисунке 38 представлен график изменения соотношения активностей во время облучения и после его окончания.

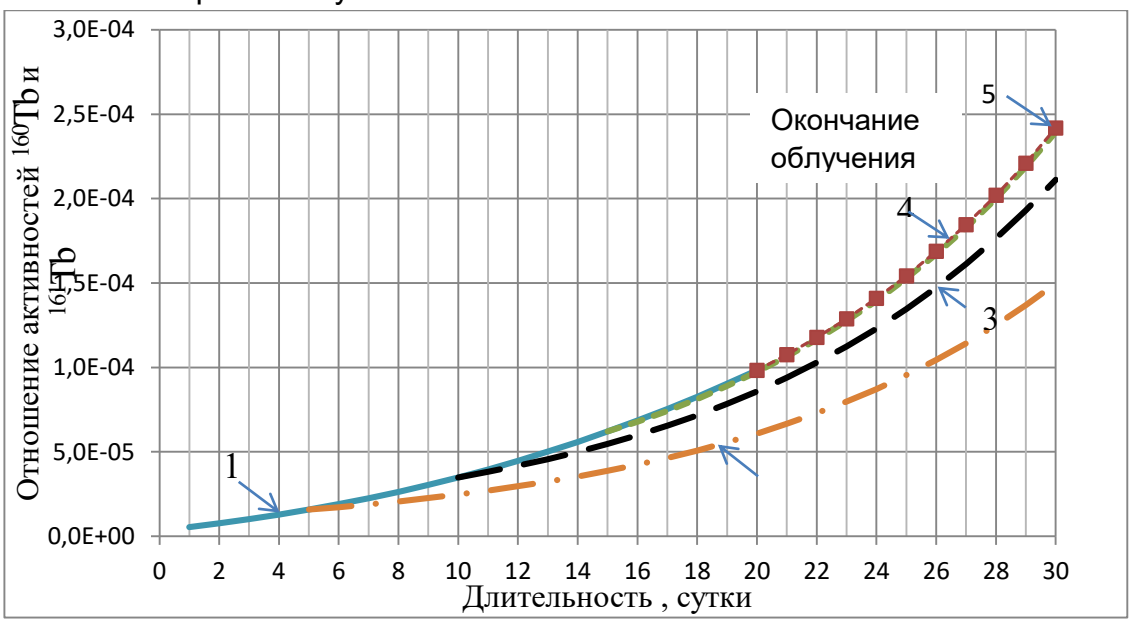


Рисунок 38 – График изменения соотношения активностей 160Tb и 161Tb: 1 – изменение соотношения активностей во время облучения; 2 - изменение соотношения активностей после 5 суток облучения; 3 - изменение соотношения активностей после 10 суток облучения; 4 – изменение соотношения активностей после 15 суток облучения; 5 –изменение соотношения активностей после 20 суток облучения

Таблица 6 – Влияние длительности облучения на параметры 161Tb

Длительность облучения 160Gd в потоке тепловых нейтронов 3.34·1014 см-2·с-1	Параметры на конец облучения		
	Активность 161Tb, ТБк/г 160Gd	Удельная активность 161Tb, Ки/г Tb	Содержание примеси 160Tb в 161Tb, %
10	1,37	109,0	0,0035
15	1,65	107,6	0,0062
20	1,78	106,0	0,0098

Таблица 7 – Срок годности препарата 161TbCl3

Допустимое содержание примеси 160Tb в 161Tb, %	Длительность облучения, сутки		
	10	15	20
0.01	12	5	0
0.07	33	26	21
0.1	37	30	25

В таблице 6 представлены результаты расчетных оценок влияния длительности облучения 160Gd в потоке тепловых нейтронов $3.34 \cdot 10^{14}$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$ на характеристики 161Tb. Из таблицы наглядно видно, что увеличение длительности облучения приводит к росту активности 161Tb, незначительному снижению его удельной активности и значительному возрастанию содержание радионуклидной примеси 160Tb. При длительности облучения 10, 15 и 20 суток нарабатывается 70, 84 и 91 % активности 161Tb, соответственно, от максимально достижимого значения 1.96 ТБк/г 160Gd. Причем после 15 суток облучения прирост активности 161Tb существенно снижается.

В настоящее время отсутствует фармакопейная статья на 161TbCl3. Если в части содержания металлических примесей можно ориентироваться на требования, установленные для 177LuCl3, то предполагаемые требования к содержанию основной радиоактивной примеси 160Tb в литературе варьируются в диапазоне от 0,01 до 0,1 %. В таблице 7 представлены расчетные оценки влияния длительности облучения 160Gd в потоке тепловых нейтронов $3.34 \cdot 10^{14}$ $см^{-2} \cdot с^{-1}$ на срок годности препарата 161TbCl3, исходя из требований к содержанию примеси 160Tb.

Бутаков Д.С.

ДОСТИЖЕНИЯ

Перечень публикаций АО «ИРМ» в 2025году:

Сведения об участии работников АО «ИРМ» в научно-технических мероприятиях:

Участие в научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.) Из них:	26
Российских	21
Международных	5
Число участников от АО «ИРМ» в научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.)	43
Число докладов на научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.)	26

В 2025 году общее количество публикаций АО «ИРМ» составило 41, из которых 27 статей опубликовано в научно-популярных журналах и трудах конференций, 13 тезисов докладов и научно-технических мероприятий, 30 публикаций входят в РИНЦ, 14 в Ядро РИНЦ, 5 статей опубликованы в журналах, входящих в Scopus и Web of sience первого, третьего и четвертого квартиля.

№	Характер документа	Название	Авторы	Источник публикации
1	статья	О возможности экспериментального сравнения изомерного отношения для ядер 186 Re при радиационном захвате реакторных тепловых и надтепловых нейтронов природным рением	Волчихина Ю.В., Гордеева Д.М., Зырянова А.А., Кольцов В.В., Русских И.М., Яковлев В.А.	Ядерная физика и инжиниринг. Vol. 16 (1),2025. С. - 51-55. doi.org/10.56304/s2079562924060460
2	статья	Влияние скорости охлаждения на формирование структурно-текстурных состояний нержавеющей стали ферритно-	Пастухов В.И., Устинов А.Е., Ярков В.Ю., Соловьева С.В., Лобанов М.Л.	Металловедение и термическая обработка металлов. № 1 (835), 2025. С. - 3-12. DOI: 10.30906/mitom.2025.1.3-12

		мартенситного класса с 12 % (масс.) хрома		
3	статья	Эволюция микроструктуры стали типа CR16-NI19 при облучении в зоне малого обогащения реактора на быстрых нейтронах. Влияние условий нейтронного облучения на структурно-фазовое состояние	Панченко В.Л., Портных И.А., Устинов А.Е.	Физика металлов и металловедение. Том 126, № 1, 2025. С.-110-122
4	статья	Эволюция микроструктуры стали типа CR16-NI19 при облучении в зоне малого обогащения реактора на быстрых нейтронах. Формирование и развитие радиационной пористости	Портных И.А., Панченко В.Л., Устинов А.Е., Козлов А.В.	Физика металлов и металловедение. Том 126, № 1, 2025. С — 98-109
5	статья	Свойства сплава Э125 при длительном низкотемпературном нейтронном облучении	Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Евсеев М.В., Панченко В.Л., Нежданов А.Г., Устинов А.Е., Самедов В.К., Соловьева С.В.	Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР. № 2, 2025. С. - 58-68

6	статья в сборнике трудов конференции	Особенности фазовых превращений в нержавеющей стали ферритно-мартенситной стали после различных термических обработок	Соловьева С.В., Ярков В.Ю., Цыгвинцев В.А., Пастухов В.И., Устинов А.Е.	Уральская школа молодых металловедов = Ural school for young metal scientists. Сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции Уральской школы-семинара металловедов - молодых ученых, посвященной 100-летию кафедры Термообработки и физики металлов . Екатеринбург, 2025. С. - 155-159
7	статья в сборнике трудов конференции	Радиационное упрочнение и диаграммы деформации аустенитной стали типа Х16Н19 после облучения в реакторе на быстрых нейтронах	Карагерги Р.П., Портных И.А., Пастухов В.И., Барсанова С.В., Козлов А.В.	Уральская школа молодых металловедов = Ural school for young metal scientists. Сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции Уральской школы-семинара металловедов - молодых ученых, посвященной 100-летию кафедры Термообработки и физики металлов . Екатеринбург, 2025. С. -161-166

8	статья в сборнике трудов конференции	Структура стали 16Х12МВСФБР, охлажденной с различной скоростью	Устинов А.Е., Ярков В.Ю., Соловьева С.В.	Уральская школа молодых металловедов = Ural school for young metal scientists. Сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции Уральской школы-семинара металловедов - молодых ученых, посвященной 100-летию кафедры Термообработки и физики металлов . Екатеринбург, 2025. С. - 66-70
9	статья в сборнике трудов конференции	Особенности образования гидридов в сплаве ZR-2,5NB	Ярков В.Ю., Пастухов В.И., Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Соловьева С.В., Самедов В.К.	Уральская школа молодых металловедов = Ural school for young metal scientists. Сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции Уральской школы-семинара металловедов - молодых ученых, посвященной 100-летию кафедры Термообработки и физики металлов . Екатеринбург, 2025. С. - 76-80

10	статья	Развитие реакторной экспериментальной базы АО «ИРМ» после 2040 г.	Третьяков И.Т., Романова Н.В., Калашников Н.С., Васюхно Д.В., Епанчинцева Д.С., Соколов С.А., Пулинец А.А., Селезнев Е.Н., Русских И.М., Роговский А.М., Зырянова А.А.	Журнал «Атомная энергия». Том 138, № 1-2. 2025. С. - 7-9
11	статья	Development outlook for the reactor experimental base of the JSC “INM” after 2040	Tret’yakov I.T., Romanova N.V., Kalashnikov N.S.,Vasyukhno D.V. , Epanchintseva D.S., Sokolov S.A., Pulinets A.A., Seleznev E.N. , Russkikh I.M., Rogovskiy A.M., Zyrianova A.A.	Atomic Energy, Volume 138, 2025, pages 6–10
12	статья	Swelling behavior of Cr16Ni19 steel under neutron irradiation: experimental and theoretical analysis	Alexey Yanilkin, Alexander Kozlov, Irina Portnykh	Journal of Nuclear Materials. Volume 610, May 2025, 155771 doi.10.1016/j.jnucmat.2025.155771
13	статья	Оценка пластичности и поврежденности материала оболочек твэлов, облученных быстрыми нейтронами	Карагерги Р.П., Портных И.А., Коновалов А.В., Барсанова С.В., Козлов А.В.	Физика металлов и металловедение. том 126, No 4. 2025. С. - 470–481.

14	свидетельство о гос.рег. Программы для ЭВМ	Система автоматизированного количественного анализа фаз	Исинбаев А.Р.	Номер свидетельства: RU 2025660470, патентное ведомство: Россия. 2025 Номер заявки: 2025618502. Дата регистрации: 11.04.2025. Дата публикации: 23.04.2025 Язык программирования: Python 3.9.6. Объем: 8 841 Байт
15	тезисы доклада на конференции	Нейтронно-физическое сопровождение эксперимента по исследованию газовыделения при проведении испытаний перспективного топлива	Чалпанов С.В., Зырянова А.А., Волчихина Ю.В., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Ташлыков О.Л.	Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения. Тезисы докладов XII Всероссийской молодежной конференции. Димитровград, 2025.С: 13-14
16	тезисы доклада на конференции	Сходимость результатов моделирования и экспериментального исследования радиационных полей источников бета-излучения	Касков Д.О., Ташлыков О.Л., Бутаков Д.С.	Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения. Тезисы докладов XII Всероссийской молодежной конференции. Димитровград, 2025. С: 146-147

17	тезисы доклада на конференции	Горизонтальные экспериментальные каналы исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М: опыт эксплуатации и устранение неплотностей	Глухов С.М., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Новгородский В.С., Ташлыков О.Л.	Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения. Тезисы докладов XII Всероссийской молодежной конференции. Димитровград, 2025. С: 37-38
18	тезисы доклада на конференции	Радиоизотопное производство АО «ИРМ»	Бутаков Д.С., Джанелидзе А.А.	Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения. Тезисы докладов XII Всероссийской молодежной конференции. Димитровград, 2025. С: 6-7
19	тезисы доклада на конференции	Электрохимические исследования питтинговой коррозии стали марки AISI 316L в условиях смешанного бета-, гамма-облучения и различной концентрации хлоридов: испытания при 25 °С	Лапин Ю.В., Голосов О.А., Хвостов С.С., Ребрин О.И.	Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения. Тезисы докладов XII Всероссийской молодежной конференции. Димитровград, 2025. С: 70-73

20	тезисы доклада на конференции	Радиационно-индуцированные процессы фазовых изменений в сплаве Э125	Соловьева С.В., Цыгвинцев В.А., Аверин С.А., Ярков В.Ю., Устинов А.Е.	Научные исследования и технологические разработки для обеспечения развития ядерных технологий нового поколения. Тезисы докладов XII Всероссийской молодежной конференции. Димитровград, 2025. С: 77
21	статья	Исследование изменения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки активной зоны реактора ИВВ-2М. Часть 1	Русских И.М., Селезнев Е.Н., Зырянова А.А., Волчихина Ю.В., Аристов Н.М., Калкшников Н.С., Горячих А.В., Кравцова О.А., Ташлыков О.Л.	Журнал «Атомная энергия». Том 138, № 3. 2025. С. - 113-117.
22	статья	Study of the coolant flow rate through the fuel assemblies of the IVV-2M reactor core. Part 1	Russkikh I.M., Seleznev E.N., Zyryanova A.A., Volchikhina Yu.V., Aristov N.M., Kalashnikov N.S., Goryachikh A.V., Kravtsova O.A., Tashlykov O.L.	Atomic Energy, Volume 138, 2025, pages 139–144
23	статья	Исследование изменения расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки активной зоны реактора ИВВ-2М. Часть 2	Русских И.М., Селезнев Е.Н., Зырянова А.А., Волчихина Ю.В., Аристов Н.М., Калашников Н.С., Горячих А.В., Кравцова О.А., Ташлыков О.Л.	Журнал «Атомная энергия». Том 138, № 5. 2025. С. - 271-275.

24	статья	Study of the coolant flow rate through the fuel assemblies of the IVV-2M reactor core. Part 2	Russkikh I.M., Seleznev E.N., Zyryanova A.A., Volchikhina Yu.V. , Aristov N.M., Kalashnikov N.S., Goryachikh A.V., Kravtsova O.A., Tashlykov O.L.	Atomic Energy, Volume 138, 2025, pages 324–330
25	статья	Влияние наводороживания на структурно-фазовое состояние сплава ZR — 2,5NB	Ярков В.Ю., Пастухов В.И., Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Соловьева С.В.	Металловедение и термическая обработка металлов. № 5 (839). 2025. С. - 28-37. DOI: 10.30906/mitom.2025.5.28-37
26	тезисы доклада на конференции	Пороговая сегментация радиационных пор с использованием сверточной нейронной сети	Исинбаев А.Р., Еноктаев Н.И.	Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных систем. Тезисы докладов Международной конференции. Саров, 2025. С. - 73-74
27	статья	Эволюция микростуктуры при нейтронном облучении стали типа CR16-NI19 на начальной стадии радиационного распухания	Портных И.А., Панченко В.Л., Устинов А.Е.	Физика металлов и металловедение. Том 126, № 5, 2025. С — 608-618. DOI: 10.31857/S0015323025050109
28	статья	Опыт материаловедческой оценки работоспособности конструкционных, поглощающих и топливных материалов реакторов с натриевым теплоносителем	Кинёв Е.А., Евсеев М.В., Аверин С.А., Портных И.А., Барыбин А.В., Глушкова Н.В.	Известия вузов. Ядерная энергетика. № 3, 2025.С. - 153 — 168. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.11

29	статья	Сравнение результатов моделирования и экспериментального исследования радиационных параметров источников бета-излучения	Касков Д.О., Ташлыков О.Л., Бутаков Д.С.	Современные проблемы физики и технологий. Сборник тезисов докладов XII Международной молодежной научной школы-конференции. Москва, 2025. С. - 99-100
30	статья	Экспериментальное исследование радиационно-защитных свойств композитных материалов на основе галлуазита	Широнина А.М., Воронин И.П., Ташлыков О.Л., Ярков В.Ю.	Международный научно-исследовательский журнал. № S10 (160), 2025, порядковый номер: 43
31	тезисы доклада на конференции	Материаловедческая оценка состояния стержней аварийной защиты и компенсации выгорания после эксплуатации в быстром натриевом реакторе средней мощности	Кинев Е.А., Евсеев М.В., Пастухов В.И., Цыгвинцев В.И., Нежданов А.Г., Ладейщиков К.Н.	Материалы и технологии энергетических установок (ЛУЧ-МТ-2025) Сборник тезисов Российской научно-технической конференции. Подольск, 14–16 октября 2025 года, С. - 121-123
32	тезисы доклада на конференции	Анизотропия свободного распухания таблеток нитрида урана в области рабочих температур и малых (до 1 % т.а.) выгораний. Сравнение с результатами испытаний UN по программам SNAP и SP-100	Бахин А.Н., Выбыванец В.И., Гонтарь А.С., Глушкова Н.В., Самедов В.К., Чернецов М.В.	Материалы и технологии энергетических установок (ЛУЧ-МТ-2025) Сборник тезисов Российской научно-технической конференции. Подольск, 14–16 октября 2025 года, С. - 60

33	статья	Послереакторное состояние материалов экспериментальных твэлов в конструктивном исполнении активной зоны БН-800. Часть 1	Кинёв Е.А., Барсанова С.В., Пастухов В.И., Цыгвинцев В.А., Глушкова Н.В.	Журнал «Атомная энергия». Том 139, № 1. 2025. С. - 59-64.
34	тезисы доклада на конференции	Безопасная эксплуатация ИЯУ ИВВ-2М с герметизированными ГЭК	Глухов С.М., Ташлыков О.Л., Селезнев Е.Н.	Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Сборник тезисов докладов XII Международной научно-практической конференции. Томск, 2025. С. - 22-21
35	статья в сборнике трудов конференции	Обеспечение безопасной эксплуатации ИЯУ после герметизации ГЭК	Глухов С.М., Зырянова А.А., Селезнев Е.Н., Скрипина В.В., Ташлыков О.Л.	Проблемы и перспективы развития энергетики. Сборник материалов VII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции. Казань, 2025. Страницы: 679-684
36	тезисы доклада на конференции	Нейтронная стресс-дифрактометрия остаточных напряжений в циркониевых каналах СУЗ РБМК	Белоусов Я.А., Александров ГО., Пастухов В.И., Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Соловьева С.В., Карпов И.Д., Эм В.Т., Губкин А.Ф.	Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2025). Тезисы докладов. Екатеринбург, 2025. С. - 187-188
37	статья	Оценка влияния храпового механизма деформации на работоспособность оболочек поглощающих элементов	Кинёв Е.А., Евсеев М.В.	Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. Выпуск 5(131), 2025. С. - 96 — 102

38	тезисы доклада на конференции	Опыт эксплуатации бериллиевых блоков в иследовательском ядерном реакторе ИВВ-2М	Волчихина Ю.В., Чалпанов С.В., Глухов С.М., Ташлыков О.Л., Русских И.М.	Безопасность ядерной энергетики. Тезисы докладов XXI Международной научно-практической конференции. Волгодонск, 2025. С. - 14-16
39	тезисы доклада на конференции	Дифракционные исследования фазового состава продуктов пирохимической переработки модельного ядерного топлива	Голосов О.А., Хвостов С.С., Губкин А.Ф., Мушников П.Н., Зайков Ю.П., Пирогов А.Н., Семкин М.А., Глушкова Н.В.	Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред (РНИКС-2025) Тезисы докладов. Екатеринбург, 2025. С. - 165-166
40	статья	Pinning vs. Nucleation of hard magnetic materials based on Nd–Fe–B-type	Urzhumtsev A.N., Maltseva V.E., Pastukhov V.I., Golubiatnicova A.A., Volegov A.S.	Phisics of metals and metallography. Том: 126, №: 8, 2025. С. - 871-882.
41	статья	Послереакторное состояние материалов экспериментальных твэлов в конструктивном исполнении активной зоны БН-800. Часть 2	Кинёв Е.А., Барсанова С.В., Пастухов В.И., Цыгвинцев В.А., Глушкова Н.В.	Журнал «Атомная энергия». Том 139, № 4. 2025. С. - 230-234.

Наукометрические показатели за 2025 год

№	**Показатель**	**Количество**
1.	Созданные РИД, шт.	6
2.	Использованные РИД, шт.	39
3.	Научные публикаций, шт.	41
	Из них: индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования, шт.	17

Прочие научно-технические достижения

Примеры внедрения созданных результатов научно-технической деятельности (РНТД)

Одним из важнейших индикаторов инновационной деятельности Общества является создание и введение в хозяйственный оборот объектов интеллектуальной собственности, позволяющих улучшать характеристики создаваемых продуктов и повышать качество проводимых научных исследований, повышать эффективность/ результативность инновационных проектов. Инновации позволяют сохранять стабильные позиции и конкурентоспособность Общества на рынке.

В отчетном году создано шесть результатов интеллектуальной деятельности, три объекта интеллектуальной собственности внедрены в производство новых для института медицинских изделий - тросовые источники на основе изотопа ^{192}Ir для гамма - терапевтических аппаратов контактного облучения отечественного и импортного производства, что позволило вывести совершенно новый для Российского рынка продукт.

При проведении нейтронографических исследований фазового состава продуктов оксидного осаждения делящихся материалов и редкоземельных металлов из хлоридных расплавов в 2025 году нашли свое применение разработанные в 2024 году подходы и методы, проведения нейтронографических исследований.

Постоянное усовершенствование методов и способов проведения научных исследований позволяет АО «ИРМ» оставаться одним из ведущих материаловедческих центров Урала. Разработки в области производства радиоизотопов приводят к увеличению выпускаемой продукции и наращиванию номенклатуры.

Участие в федеральных и отраслевых программах, получение грантов и других форм поддержки

В рамках реализации входящего в национальный проект «Новые атомные и энергетические технологии» Федерального проекта «Новая атомная энергетика» АО «ИРМ» являлся исполнителем работ:

— «Экспериментальные исследования по определению влияния нейтронного облучения на коррозионную стойкость в свинцовом теплоносителе стали марки ЭП302-Ш, а также ее сварных соединений на этапе 2024-2025 гг.»;

— «Исследование переноса летучих радионуклидов в трубопроводах СКАГ и фильтроматериалов, в том числе при наличии конденсата воды»;

— «Работы по разработке и обоснованию безопасности применения ядерного топлива для ядерных реакторов различных типов: проведение прецизионных сравнительных экспериментов по определению выхода инертных радиоактивных газов из облученных таблеток UO2 и МОКС в нормальных условиях и при нарушениях нормальной эксплуатации»;

— «Нейтронографические исследования фазового продуктов оксидного осаждения ДМ и РЗМ из хлоридных расплавов»;

— «Разработка РКД на установку компактирования продуктов ВТО реального ОЯТ в горячей радиационно-защитной камере и изготовление узлов»;

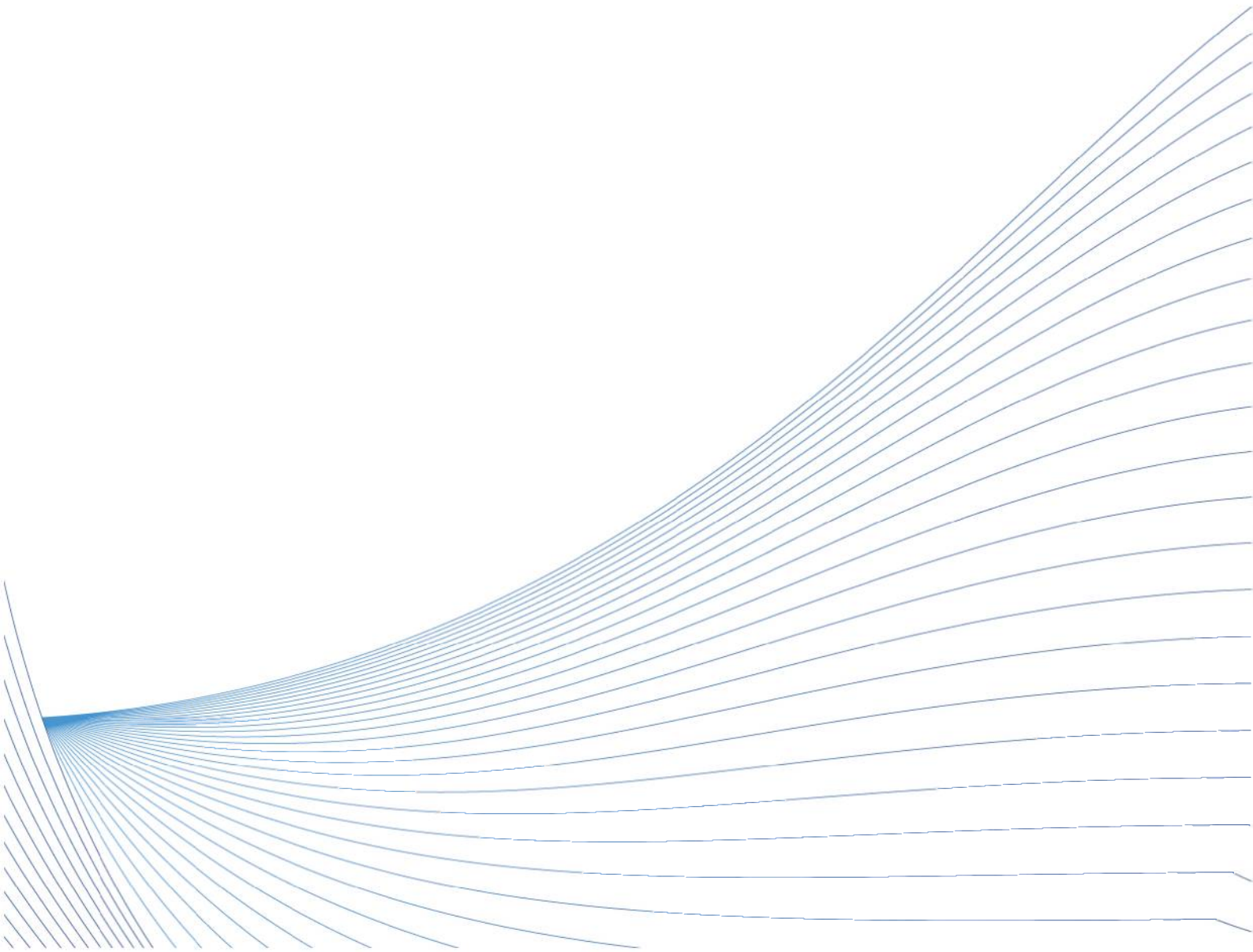
— «Получение экспериментальных данных, необходимых для анализа причин развития локального межкристаллитного окисления образцов стали ЭП-823-Ш при проведении коррозионных испытаний»

В 2025 году в АО «ИРМ» выполнялись работы по Проектам Единого Отраслевого Тематического Плана Госкорпорации «Росатом»:

— «Разработка устройств и методов для внутриреакторного оперативного контроля плотности возмущенного потока тепловых нейтронов, выхода легколетучих продуктов деления из перспективных топливных материалов, а также послереакторного определения глубины их выгорания»;

— «Создание полнофункционального образца технологической линии по производству 161TbCl3».

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ



Сотрудничество с вузами и институтами РАН

В АО "ИРМ" действует соглашение о научном сотрудничестве с ФГАОУ ВПО "УрФУ".

Эксперты АО «ИРМ» участвуют в проведении государственной итоговой аттестации по направлениям: «Автоматизация технических процессов и производств (по отраслям)», «Электрические станции, сети и системы», «Программирование в компьютерных системах», «Экономика и бухгалтерский учет».

АО «ИРМ» развивает взаимовыгодное сотрудничество с университетами и колледжами в научно-исследовательской сфере, касающейся подготовки квалифицированных специалистов в области прикладных ядерных технологий, путем реализации партнерских практико-ориентированных образовательных программ и эффективного использования научного потенциала образовательных учреждений и аппаратурно-технической базы АО «ИРМ» при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в том числе прохождения практической подготовки студентов с привлечением работников предприятия в качестве наставников (ФГАОУ ВО УрФУ, ФГАОУ УГЛТУ, УГГУ, НИЯУ МИФИ, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»**).**

В отчетном году общее количество студентов, прошедших практическую подготовку – 16 человек по разным специализациям в т.ч. по ядерным направлениям.

В ФГАОУ ВО «УрФУ» учатся 9 аспирантов и 2 соискателя по разным направлениям подготовки.

В настоящее время в АО «ИРМ» работают 10 человек, имеющих ученую степень кандидатов наук.

Проводятся ознакомительные стажировки для преподавателей УрФУ.

В АО "ИРМ" для студентов высших учебных заведений реализуется программа научных стажировок «Лаборатория роста Росатома», направленная на отбор и привлечение студентов к стажировкам с целью обеспечения молодыми кадрами в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Программа позволяет в ходе обучения получить практический опыт взаимодействия с предприятием отрасли, сформировать четкое объективное видение будущей специальности. Программа реализуется совместными усилиями с научными руководителями - наставниками. В 2025 года трудоустроены на срочный трудовой договор два студента Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина", 6 студентов УрТК НИЯУ МИФИ с целью закрытия вакансий по рабочим профессиям.

Организована стажировка преподавателей УрФУ и УрТК НИЯУ МИФИ для получения практических навыков и компетенций по профилю соответствующей образовательной программы на площадке АО «ИРМ», а также для модернизации существующей системы профессионального образования с целью повышения качества подготовки студентов.

Результат стажировки преподавателей УрФУ зафиксирован протоколом научно-педагогических работников кафедры экспериментальной физики от

13.03.2025г. №2. В рабочую программу по дисциплине «Источники ионизирующего излучения» внесены темы: «Разделение помещений при производстве радионуклидов. Обеспечение норм радиационной безопасности», «Исследовательские ядерные установки ИЯУ ИВВ-2М».

АО "ИРМ" оказывает содействие в ранней профориентации студентов, приобщает к Чемпионатному движению WorldSkills/ Atomskills с целью повышения престижа рабочих профессий, мотивации рабочих к совершенствованию профессиональных навыков в избранной профессии. Институт развивает экспертные сообщества, создает среду для раскрытия, развития и применения потенциала каждого работника.

Эксперты АО «ИРМ» принимают участие в Курчатовских чтениях школьников.

Молодые специалисты АО «ИРМ» приняли участие в ключевых федеральных и отраслевых мероприятиях:

Хвостов С.С., начальник лаборатории технологий обращения с РАО и коррозионных процессов отделения радиационного материаловедения принял участие в образовательном форуме УрФУ «Инженерный олимп» в рамках Всероссийской олимпиады «Я – Профессионал» г. Екатеринбург (май 2025 г.);

Лапин Ю.В., младший научный сотрудник отделения радиационного материаловедения принял участие в отраслевой научной школе «Радиохимические технологии» г. Москва (август 2025 г.), в Конгрессе лидеров молодежных сообществ, г. Москва (сентябрь 2025 г.);

Китик М.С., инженер 2 категории отделения радиационного материаловедения и Романченко Ю.С., инженер 2 категории отделения радиационного материаловедения принял участие в отраслевой научной школе «Радиохимические технологии» г. Москва (август 2025 г.).

Молодые специалисты АО «ИРМ» проводят профориентационные экскурсии для школьников города Заречный для развития профессионального сотрудничества и партнерских отношений, популяризации прикладной науки и формирования кадрового потенциала предприятия. В 2025 году производственную площадку предприятия посетили более 120 учащихся.

Международное сотрудничество

В настоящее время АО «ИРМ» производит востребованную на мировом рынке продукцию на основе пяти радиоизотопов: ряд соединений, меченных углеродом-14, иридий-192 и источники на его основе, лютеций-177 и радиофармацевтический прекурсор трихлорид лютеция, цезий-131 в форме водорастворимой соли, источники на основе селена-75.

В 2025 году АО «ИРМ» на регулярной основе осуществляло поставки радиоизотопного соединения Lu-177 с.а. компании Moltek (Турция). Также в этот год были начаты поставки серийных партий Lu-177 с.а. индийским заказчикам.

В рамках расширения линейки производимой радиоизотопной продукции продолжалась отработка технологии получения радиоизотопа 161Tb, основанная на облучении 160Gd тепловыми нейтронами в реакторе. Произведённые партии $^{161}TbCl_3$ поставлялись в ФГБУ «РНЦРХТ им. ак. А.М. Гранова» Минздрава России,

ФГБУ «НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ»; впервые осуществлена поставка зарубежному заказчику.161Tb рассматривается как перспективный изотоп для радиолигандной терапии и более эффективный аналог, чем 177Lu благодаря испусканию не только β-частиц ($E_{\beta(средн.)}$=154 кэВ), но конверсионных и Оже-электронов с энергиями 3-50 кэВ (224%). Пробег этих электронов в физиологических тканях составляет менее 100 нм, что обеспечивает более высокую линейную передачу энергии, в результате чего поглощенная клетками доза окажется значительно выше, чем при использовании 177Lu. Это обеспечивает более высокую эффективность ^{161}Tb при микрометастатических поражениях.

В 2025 году предприятием успешно выполнен 1-ый этап проекта ЕОТП «Создание полнофункционального образца технологической линии по производству 161TbCl3», целью которого является создание опытной технологической линии, позволяющей увеличить объем и активность перерабатываемой мишени, а также сокращающей время протекания процесса, хроматографического разделения и получения 161TbCl3. В настоящее время подобной технологической линии не существует и требуется проведение исследований, разработка технических и технологических решений для радиационно-защитного и технологического оборудования, систем автоматизации и обеспечения безопасности технологического процесса, а также их экспериментальная проверка в условиях создаваемой опытной технологической линии, возможности которой обеспечат получение партии 161TbCl3, удовлетворяющей потребностям и объему рынка, а также её возможную последующую интеграцию в технологическую цепочку GMP завода в г. Обнинск.

В 2025 году был успешно реализован комплекс мероприятий по достижению ключевых результатов инвестиционного проекта по созданию производства тросовых источников на основе радиоизотопа 192Ir для нужд высокодозной брахитерапии.

В рамках выполнения запланированных мероприятий проекта были достигнуты следующие результаты:

- разработан комплект конструкторской и технологической документации на изготовление опытных образцов имитаторов и тросовых источников;
- разработан технологический процесс изготовления тросовых источников на основе изотопа Ir-192;
- технология создания тросового источника защищена объектами интеллектуальной собственности в виде секретов производства;
- сформирован портфель заказов на поставку тросовых источников в объеме 600 единиц;
- заключен договор на сертификацию ГОСТ ISO 13485-2017;
- получен Сертификат соответствия СМК АО "ИРМ" МИ на соответствие ГОСТ ISO 13485-2017 (достигнут уровень TRL 7);
- разработана и аттестована методика измерения кермы в воздухе с использованием наперстковой ионизационной камеры;
- заключен договор поставки тросовых источников на основе изотопа Co-60;
- осуществлён ввод линии по производству тросовых источников на основе изотопа 192Ir для гамма-терапевтических аппаратов контактного облучения в

промышленную эксплуатацию (достигнут уровень TRL 8);

•проведено внедрение РИД в производство тросовых источников на основе 192Ir;

•осуществлен выпуск первой тестовой партии тросовых источников на основе изотопа 192Ir для гамма-терапевтических аппаратов контактного облучения (достигнут уровеньTRL 9).

Мероприятия, реализуемые АО «ИРМ» в рамках работы по развитию кадрового потенциала

Кадровый потенциал

В настоящее время в АО «ИРМ» работают 10 человек, имеющих ученую степень кандидатов наук.

В ФГАОУ ВО «УрФУ» учатся 12 аспирантов и 1 соискатель по разным направлениям подготовки научных специалистов.

Ранняя профориентация

Впервые АО «ИРМ» совместно с МАОУ МО Заречный, УрТК НИЯУ МИФИ подготовили и направили в образовательный центр «Сириус» (г. Сочи) уникальных, талантливых детей для демонстрации высокого мастерства и основательной подготовки своих проектов по четырем научным направлениям: новые материалы и технологии, технологии энергетики будущего, лазерные технологии, термоядерные и плазменные технологии по образовательной программе «Наука. Искусство. Атом» на федеральной территории.

Общими усилиями ребята создают проекты, которые станут в ближайшие годы основой развития международного детского- юношеского сообщества и молодежи. Участие в проекте позволяет сформировать у школьников привлекательный образ научной карьеры, выбрать и поступить в вуз, где реализуются профильные для научных организаций Росатома специальности.

Впервые реализована программа технических туров для школьников старших классов школ МО Заречный.

Программа стажировок для студентов

В АО «ИРМ» для студентов высших учебных заведений реализуется программа научных стажировок «Лаборатория роста Росатома», направленная на отбор и привлечение студентов к стажировкам с целью обеспечения молодыми кадрами в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Программа позволяет в ходе обучения получить практический опыт взаимодействия с предприятием отрасли, сформировать четкое объективное видение будущей специальности. Программа реализуется совместными усилиями с научными руководителями - наставниками. В 2025 года трудоустроены на срочный трудовой договор два студента Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина", 6 студентов УрТК НИЯУ МИФИ с целью закрытия вакансий по рабочим профессиям. 24 студента прошли практику по разным специализациям в т.ч. по ядерным направлениям.

Подготовка в колледжах и университетах

На площадке АО «ИРМ» для модернизации существующей системы профессионального образования, повышения качества подготовки студентов была реализована очная программа стажировок преподавателей колледжей и университетов для получения ими практических навыков и компетенций по профилю соответствующей образовательной программы.

Преподаватели УрФУ проходили стажировку по следующим программам:

«Ядерные реакторы и материалы»;

«Получение практических знаний о возможностях и особенностях эксплуатации исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М»;

«Материаловедение».

Преподаватели УрТК НИЯУ МИФИ проходили стажировку по программе «Контроль и метрологическое обеспечение производства работ, проводимых на предприятии атомной отрасли».

Результатом стажировки станут обновленные программы подготовки с учетом специфики деятельности АО «ИРМ». Молодые ученые ИРМ в течение года провели 2 профориентационные встречи со студентами УрТК НИЯУ МИФИ по научным и инженерным направлениям деятельности.

Развитие действующих сотрудников

Создание условий для участия и победы молодых сотрудников в научных конференциях, форумах, конкурсах: младший научный сотрудник лаборатории конструкционных материалов и нанотехнологий Ярков В.Ю. занял 2 место на конкурсе докладов XV международного уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов» с докладом «Применение метода ориентационной микроскопии для изучения структурно — фазового состояния облученного циркониевого сплава» на секции «Топливо для ядерной энергетики».

С целью развития научной карьерной траектории работников с высшей квалификацией в АО «ИРМ» созданы условия для успешной защиты кандидатских диссертаций, такие как своевременное закрепление наставника и получение рецензии научно-технического совета Общества.

Работа с сотрудниками «серебряного» возраста

Сотрудники «серебряного» возраста, обладая экспертным опытом и применяя на практике инструменты Производственной системы «Росатома», оптимизируют производственные процессы предприятий отрасли в рамках Чемпионата по ПСР среди первичных трудовых коллективов. Улучшая производственные процессы АО «ИРМ», за счет внедрения предложений по улучшению и устройств малой механизации «Каракури», вовлекают молодых работников в процесс непрерывных улучшений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АО «ИРМ» - материаловедческий центр атомной отрасли, основными объектами экспериментальной базы института являются исследовательская ядерная установка ИВВ-2М с размещёнными на ней уникальными реакторными стендами, и корпус защитных камер.

ИРМ проводит полный комплекс исследований материалов и изделий ядерной техники, включая дореакторные исследования, реакторные испытания и послереакторные исследования в рамках следующих основных направлений:

— обоснование безопасной и эффективной эксплуатации материалов и элементов активных зон действующих энергоблоков АЭС (РБМК-1000, БН-600/800);

— исследования топлива, материалов и элементов технологий двухкомпонентной атомной энергетики (уран-плутониевое топливо для ВВЭР, перспективные конструкционные материалы реакторов на быстрых нейтронах с натриевым и свинцовым теплоносителем и др.);

— испытания топлива и материалов перспективных ядерных установок (ВТГР, Шельф-М и др.);

— разработка и внедрение новых технологий для получения полезных радиоизотопных продуктов для промышленности и медицины.

Уникальные компетенции Института реакторных материалов востребованы для решения актуальных задач, направленных на развитие перспективных разработок атомной отрасли и обеспечение безопасной эксплуатации действующих объектов использования атомной энергии.