

На правах рукописи



Асхадуллин Радомир Шамильевич

**Разработка устройств регулирования содержания примеси
растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых
жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец–висмут)
исследовательских стендов и перспективных
реакторных установок**

Специальность: 2.4.9 – Ядерные энергетические установки,
топливный цикл, радиационная безопасность

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Обнинск, 2025

Работа выполнена в акционерном обществе «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского»

Официальные

оппоненты:

Зайков Юрий Павлович

член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор, научный руководитель Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИВТЭ УрО РАН), г. Екатеринбург

Красин Валерий Павлович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (Московский Политех), г. Москва

Рисованный Владимир Дмитриевич

доктор технических наук, профессор, научный руководитель акционерного общества «Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение «ЛУЧ» (АО «НИИ НПО «ЛУЧ»), г. Подольск

Ведущая организация:

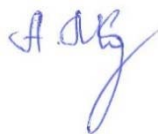
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ), г. Нижний Новгород

Защита состоится «28» января 2026 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 75.1.077.01 на базе акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» по адресу: 239033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и на сайте <https://www.ippe.ru>

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 75.1.077.01
доктор технических наук



А.В. Морозов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической проблемы в области технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) исследовательских стендов и перспективных ядерных реакторов малой и средней мощности: в диссертации изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения (конструкции и регламенты работы массообменных аппаратов с твердофазным источником кислорода) по обеспечению эффективного и безопасного регулирования содержания (термодинамической активности) растворенного кислорода в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителях исследовательских стендов и перспективных реакторных установок малой и средней мощности для обеспечения повышенного ресурса работы используемых в них конструкционных сталей, внедрение этих решений вносит значительный вклад в развитие атомной отрасли Российской Федерации.

Актуальность темы исследования

Расплавы свинца и сплава свинца с висмутом эвтектического состава (44,5 % Pb – 55,5 % Bi) нашли применение или предполагаются к использованию в качестве жидкометаллических теплоносителей во многих областях науки и техники. Исследования теплофизических характеристик этих расплавов, возможностей и технологий их применения в качестве жидкометаллических теплоносителей начаты в 50-х годах XX века при создании реакторных установок (РУ) для атомных подводных лодок (АПЛ) с ядерными реакторами, охлаждаемыми теплоносителем свинец-висмут. Опыт эксплуатации АПЛ и результаты проведенных при их создании расчетных и экспериментальных исследований побудили в дальнейшем приступить к разработке ряда ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями — свинцом и свинцом-висмутом. Среди них (в стадии разработки) — реактор малой мощности «СВБР-100» и микрореакторы «СВИР», «СВГТ» со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Начато строительство опытно-демонстрационной установки «БРЕСТ-ОД-300» с быстрым реактором со свинцовым теплоносителем, предназначенной для

исследования и эксплуатационного подтверждения технической реализации принципов крупномасштабной ядерной энергетики: исключения аварий, требующих эвакуации населения; полного использования уранового сырья за счет вовлечения U-238; решения проблемы обращения с долгоживущими высокоактивными отходами (минорные актиниды и др.) и накопления отработанного ядерного топлива (последовательное приближение к радиационно-эквивалентному (по отношению к природному сырью) захоронению радиоактивных отходов); технологической поддержки режима нераспространения; достижения требований конкурентоспособности в сравнении с другими видами электрогенерации. Выполнены концептуальные проработки реакторной установки «БР-1200» с быстрым реактором со свинцовым теплоносителем. Установки «БРЕСТ-ОД-300», «БР-1200» и «СВБР-100» относятся к четвертому поколению реакторов, при создании которых должны применяться такие технические решения, которые в принципе не способны привести к тяжелым авариям или полностью их предотвращают.

На сегодняшний день Стратегией развития ядерной энергетики России и соответствующими документами Международного агентства по атомной энергии определено, что важным звеном будущей отечественной и мировой энергетики являются реакторы на быстрых нейтронах. Практически в каждой промышленно развитой стране реализуется своя программа развития энергетики с использованием быстрых реакторов. Так, в Японии разработан проект быстрого реактора (PBWFR) с теплоносителем свинец-висмут, а в Европе предлагаются к созданию энергосистемы на основе быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем.

При разработках технических систем ядерного направления с ТЖМТ в России и за рубежом используется обширная экспериментальная база, включающая реакторные петли, исследовательские стенды с циркуляционными контурами с ТЖМТ для ядерно-физических, теплофизических, гидравлических, коррозионных, ресурсных и других исследований и испытаний.

Вместе с тем, расплавы свинца и его сплава с висмутом оказывают коррозионно-активное воздействие на конструкционные материалы ЯЭУ и

других аппаратов и могут применяться в циркуляционных неизотермических контурах из сталей только при наличии на поверхностях последних защитных оксидных покрытий. Покрытия же эти формируются и присутствуют на сталях только при строго заданных диапазонах значений концентраций растворенного в расплавах кислорода. При меньших или больших концентрациях защитные покрытия разрушаются соответственно вследствие диссоциации или чрезмерного увеличения их толщины и рыхлости. Положение осложняется еще тем, что однократно сформированное защитное покрытие не может предотвратить коррозионно-эрозионное разрушение сталей в течение всего срока эксплуатации РУ, так как для герметичных неизотермических циркуляционных контуров с ТЖМТ характерно естественное раскисление теплоносителя (самопроизвольное снижение содержания растворенного в нем кислорода) вплоть до достижения состояния, при котором начинается диссоциация защитных покрытий и развитие коррозионно-эрозионных процессов разрушения сталей. Данное явление обусловлено диффузией основных компонентов конструкционных сталей, главным образом железа, из матрицы стали на внешнюю поверхность покрытия и далее в объем теплоносителя. Диффундирующие компоненты обладают большим сродством к кислороду, чем теплоноситель. Поэтому они взаимодействуют с растворенным кислородом, образуя твердые оксиды. При этом содержание кислорода в ТЖМТ уменьшается (т. е. реализуется процесс раскисления теплоносителя). Темп и глубина раскисления тяжелого жидкометаллического теплоносителя определяются температурным режимом контура, составом и величиной поверхностей используемых конструкционных сталей и т. д.

Для поддержания содержания растворенного кислорода в ТЖМТ на уровне, обеспечивающем формирование на сталях контура защитных оксидных покрытий и их сохранение при эксплуатации, необходимы непрерывный контроль содержания кислорода, растворенного в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе, и регулируемая подпитка ТЖМТ растворенным кислородом.

На первоначальном этапе применения свинца-висмута и свинца (при эксплуатации реакторов АПЛ, их наземных прототипов, реакторных петель и

экспериментальных стендов того времени для отработки технологии обращения с ТЖМТ для АПЛ) использовались различные устройства и методы непрерывного контроля содержания (термодинамической активности (ТДА)) примеси растворенного кислорода в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе и подпитки ТЖМТ растворенным кислородом. Из них наиболее разработанными являлись:

- устройства и методы контроля — датчики ТДА кислорода пробирочного и таблеточного типа на основе гальванического концентрационного элемента с использованием керамической пробирки или таблетки из твердого оксидного электролита (диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия) с ионной проницаемостью по кислороду;
- устройства и методы подпитки ТЖМТ растворенным кислородом: газофазные, основанные на подаче газовых смесей (He-O_2 , Ar-O_2 , $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O-He}$, $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O-Ar}$) в газовый объем циркуляционного контура, на поверхность и в поток тяжелого жидкометаллического теплоносителя при использовании накателей газа, сопловых насадок и эжекторов;
- твердофазный метод «холодной точки», при котором в холодной части циркуляционного контура размещается оксид, растворяющийся в процессе эксплуатации установки.

Необходимо отметить, что практически все создаваемые в то время РУ и экспериментальные устройства имели петлевую конструкцию и относительно малые свободные поверхности ТЖМТ ($\sim 1 \text{ м}^2$) и загрузки тяжелого жидкометаллического теплоносителя (до 5 м^3). Применительно к этим условиям и разрабатывались технологии и устройства обращения с ТЖМТ. Создаваемые в настоящее время РУ имеют усовершенствованную петлевую или моноблочную конструкции с существенно большими (до 1000 м^3) загрузками и свободными поверхностями тяжелого жидкометаллического теплоносителя, а также большим требуемым ресурсом эксплуатации на максимальной мощности. Выяснилось, что применение в создаваемых РУ ранее разработанных устройств и методов контроля содержания в ТЖМТ кислорода и подпитки тяжелого жидкометаллического теплоносителя растворенным кислородом неэффективно.

Возникла острая необходимость разработки нового эффективного и безопасного метода регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного

кислорода в свинцовом, свинцово-висмутовом теплоносителях создаваемых реакторных установок и исследовательских стендов (установок), а также надежных устройств его практической реализации.

В связи с изложенным выше является весьма актуальным экспериментально-расчетное обоснование возможности регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителях реакторных установок нового поколения, исследовательских стендов (установок) методом и средствами управляемого растворения твердофазного оксида свинца (массообменными аппаратами (МА)). Указанная разработка позволит более эффективно решать основные задачи технологии тяжелого теплоносителя:

1) обеспечение чистоты теплоносителя и поверхностей его циркуляционного контура для поддержания проектных теплогидравлических характеристик установки при длительных ресурсах работы;

2) предотвращение коррозии и эрозии конструкционных материалов (повышение их срока эксплуатации) при длительных ресурсах работы установки.

Степень разработанности темы исследований: автором проведено исследование возможностей использования ранее разработанных технологии и устройств обращения с ТЖМТ в условиях реакторных установок нового поколения со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями, а также в условиях российских и зарубежных исследовательских стендов (установок); выявлено, что применение ранее разработанных устройств и методов контроля содержания кислорода в свинце (свинце-висмуте) и подпитки ТЖМТ растворенным кислородом неэффективно; сформулированы и решены задачи исследования, необходимого для обоснования нового метода регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцовом (свинцово-висмутовом) теплоносителе; разработаны, изготовлены и эксплуатируются устройства реализации разработанного автором метода на 13 исследовательских российских и зарубежных стендах; разработана структура и алгоритмы автоматизированной системы регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ, созданы и успешно испытаны макетные экспериментальные образцы этой

системы; результаты разработок по массообменным аппаратам и автоматизированным системам регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ использованы при подготовке проектной документации реакторных установок «БРЕСТ-ОД-300» и «СВБР-100».

Цель исследования заключается в разработке устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в ТЖМТ, их изготовлении, испытаниях, адаптации к технологическим процессам, поставке в составе систем технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя (свинец, свинец-висмут) на многочисленные исследовательские стенды для обеспечения технологии тяжелого теплоносителя (ТТТ) и проведения длительных ресурсных испытаний конструкционных сталей и изделий (компонентов) жидкометаллических контуров проектируемых реакторных установок «БРЕСТ-ОД-300», «СВБР-100», «БР-1200», «МАСММ», а также в принципиальной разработке и обосновании конструкций массообменных аппаратов для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцово-висмутовом и свинцовом теплоносителях перспективных реакторных установок гражданского назначения.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1) Анализ существующих методов и средств регулирования содержания примеси растворенного кислорода в циркуляционных контурах и установках с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (Pb, Pb–Bi).

2) Физико-химические исследования в обоснование применения твердофазного метода для регулирования содержания (термодинамической активности) примеси растворенного кислорода в свинцовом (свинцово-висмутовом) теплоносителе.

3) Разработка и обоснование конструкций массообменных аппаратов (МА) для исследовательских стендов и установок с теплоносителями Pb, Pb–Bi, длительная эксплуатация МА в составе многочисленных стендов.

4) Разработка и обоснование конструкции массообменного аппарата для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцово-висмутовом теплоносителе реакторных установок гражданского назначения.

5) Разработка методологии создания и обоснование конструкции массообменного аппарата для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцовом теплоносителе реакторных установок малой и средней мощности.

Научная новизна настоящей работы заключается в следующих результатах теоретических и экспериментальных исследований.

1. Впервые выполнены экспериментальные исследования кинетики растворения гранул PbO в расплаве свинца в зависимости от температуры и скорости теплоносителя, числа слоев (высоты засыпки) гранул PbO . Получена эмпирическая зависимость в виде безразмерного критериального соотношения, характеризующая кинетику растворения в расплаве свинца стационарной засыпки гранул из PbO .

2. Впервые проведены экспериментальные исследования в условиях жидкометаллического контура по определению коэффициентов гидравлического сопротивления при прохождении ТЖМТ через засыпку из гранул оксида свинца в диапазоне скоростей (0,03 – 0,67) м/с. На основании полученных экспериментальных данных рекомендована зависимость для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления слоя засыпки из гранул PbO .

3. Впервые разработаны и обоснованы конструкции массообменных аппаратов с внутренними и внешними нагревателями, механическими насосами, дискретной и непрерывной подачей газовой среды, капельного типа для циркуляционных стендов и статических установок с ТЖМТ.

4. Впервые выполнены испытания и опытная эксплуатация массообменных аппаратов на циркуляционных стендах (10 типов МА) и стационарных установках (2 типа МА). Общая наработка аппаратов составила более 75000 ч. Достигнутое время эксплуатации МА без его замены составляет 13000 ч.

5. Впервые разработана методика расчетно-экспериментального определения производительности массообменных аппаратов с различными побудителями расхода теплоносителя через засыпку из гранул PbO .

6. Впервые сформулирована концепция и структура автоматизированной системы регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ и выполнены комплексные

исследования на неизотермическом циркуляционном контуре с ТЖМТ по отработке автоматизированного поддержания заданного кислородного режима в теплоносителе, используя массообменный аппарат и датчики термодинамической активности кислорода.

7. Впервые разработана конструкция массообменного аппарата для модульных РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура (с объемом теплоносителя до 30 м³) и проведены экспериментальные исследования на макетном образце МА.

8. Впервые разработана конструкция массообменного аппарата для РУ со свинцовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура (с объемом теплоносителя до 1000 м³) и выполнены расчетно-экспериментальные исследования для ее обоснования. Определены требования к высоте слоя засыпки из гранул оксида свинца и расходу теплоносителя через реакционную емкость МА, обеспечивающему приемлемую производительность данного устройства по кислороду.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что содержащиеся в ней результаты и разработки в значительной мере расширяют представления о физико-химических процессах, протекающих в циркуляционных неизотермических контурах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями, о результатах их влияния на ТЖМТ, конструкционные материалы и оборудование контуров, о способах контроля и регулирования их интенсивности.

Практическая ценность результатов работы и её внедрение. Научно-технические результаты диссертации Асхадуллина Р. Ш. используются при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». Период использования результатов, полученных в диссертации: с 2000 г. по настоящее время. Объем использования результатов, полученных в указанной диссертации:

- при изготовлении гранулированного оксида свинца в количестве ~ 720 кг;
- при разработке, изготовлении и поставке на исследовательские установки АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» массообменных аппаратов в количестве 33 шт.;
- при разработке, изготовлении и поставке на исследовательские установки АО «НИКИЭТ» массообменных аппаратов в количестве 10 шт.;

- при разработке, изготовлении и поставке на исследовательские установки ЦНИИ КМ «Прометей» массообменных аппаратов в количестве 7 шт.;
- при разработке, изготовлении и поставке на исследовательские установки АО «ЦКБМ» массообменных аппаратов в количестве 4 шт.;
- при разработке, изготовлении и поставке на исследовательский стенд «ФТ-4» НГТУ 1 массообменного аппарата;
- при разработке, изготовлении и поставке на исследовательскую установку АО «ИРМ» 1 массообменного аппарата;
- при разработке, изготовлении и поставке на исследовательский стенд «CIRCE» (ENEA, Бразимоне, Италия) 1 массообменного аппарата;
- при разработке, изготовлении и поставке на исследовательский стенд «ЭТГС» ФГУП «НИТИ» 1 массообменного аппарата.

Разработанные в диссертации конструкции 58 массообменных аппаратов, которые испытывались, эксплуатировались и планируются к эксплуатации на циркуляционных стендах и стационарных установках в ГНЦ РФ – ФЭИ, ЦНИИ КМ «Прометей», НИКИЭТ, ЦКБМ, ИРМ, НГТУ, НИТИ, ENEA (Италия), позволили и позволят в дальнейшем обеспечить противокоррозионную защиту (ресурс) конструкционных сталей исследовательских стендов с ТЖМТ. На основании этих результатов, а также выполненной в диссертации проработки МА для реакторных установок с теплоносителями Pb и Pb–Bi автором выданы рекомендации в материалы технических проектов массообменных аппаратов для реакторных установок «БРЕСТ-ОД-300» (с возможностью переноса в РУ «БР-1200»), «СВБР-100» (с возможностью переноса в РУ «МАСММ»).

Режимы работы разработанных в диссертации конструкций массообменных аппаратов, поставленных на исследовательские стенды с ТЖМТ или рекомендованных автором в технические проекты МА реакторных установок с ТЖМТ, позволят поддерживать заданные кислородные режимы для противокоррозионной защиты сталей как в реакторных установках со свинцом и свинцом-висмутом, так и в исследовательских стендах с ТЖМТ. Важно и то, что эти результаты и разработки могут быть применимы не только при создании и эксплуатации ядерных реакторов, но также и в других областях науки и техники.

Возможной областью их применения могут быть ускорительно управляемые системы (электроядерные установки), разрабатываемые во многих странах. В настоящее время в России проработаны варианты конструктивных схем нейтроногенирирующих мишеней, создана и испытана мишень, в которой пучок нейтронов воздействует через стальную мембрану на циркулирующий в замкнутом контуре расплав свинца с висмутом.

Методология работы состоит в изучении процесса растворения гранулированного оксида свинца в расплавах свинца (свинца-висмута) и разработке конструкций массообменных аппаратов, заполненных гранулированным PbO, для решения задач управляемой подпитки растворенным кислородом ТЖМТ исследовательских стендов и реакторных установок с интегральной компоновкой первого контура.

Методы исследований, примененные автором:

- метод водородного восстановления окисленных расплавов (для изучения растворимости кислорода в свинце (свинце-висмуте));
- метод измерения ТДА примеси растворенного кислорода в Pb (Pb–Bi) с использованием датчиков активности кислорода (ДАК) при изменении температуры, скорости ТЖМТ, числа слоев (высоты засыпки) гранул оксида PbO (для изучения кинетики растворения гранул в Pb (Pb–Bi) и определения производительности массообменных аппаратов — устройств подпитки ТЖМТ растворенным кислородом);
- рентгенофазовый метод анализа (для изучения процессов «отравления» поверхности гранул PbO примесью железа, находящейся в ТЖМТ);
- метод атомно-эмиссионного спектрометрического анализа (совместное определение примесей Fe, Cu, Ni, Co, Cr (в числе других определяемых элементов) в порошке или гранулах оксида PbO с пределом обнаружения (10^{-4} – 10^{-3}) % мас.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментально-расчетного определения температурной зависимости растворимости кислорода в свинце (свинце-висмуте).

2. Результаты экспериментально-расчетного исследования кинетики растворения гранул PbO в расплаве свинца в зависимости от температуры и скорости ТЖМТ, числа слоев (высоты засыпки) гранул оксида PbO .

3. Результаты разработки различных конструкций массообменных аппаратов для исследовательских стендов и установок с ТЖМТ и их длительной эксплуатации в составе экспериментальных стендов.

4. Результаты разработки конструкции массообменного аппарата для реакторной установки со свинцово-висмутовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура (с объемом теплоносителя до 30 м^3).

5. Результаты разработки конструкции массообменного аппарата для реакторной установки со свинцовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура (с объемом теплоносителя до 1000 м^3).

Достоверность основных научных положений и выводов обеспечивается воспроизводимостью результатов экспериментов, использованием на экспериментальных стендах современных методик исследований и метрологически аттестованных приборов.

Апробация работы обеспечивалась тем, что основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на международной конференции по ядерной энергетике ICONE-17 (Брюссель, Бельгия, 2009 г.), международной конференции по теплогидравлике ядерных реакторов NURETH-11 (Авиньон, Франция, 2005 г.), международной конференции Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17) (Екатеринбург, Россия, 2017 г.), международной конференции Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR22) (Вена, Австрия, 2022 г.), международной конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (Обнинск, Россия, 2003, 2008, 2013, 2018 гг.), научно-технической конференции «Теплофизика» (Обнинск, Россия, 2002, 2005, 2010 – 2015, 2018, 2020, 2022, 2024 гг.), X Российской конференции «Металлургия расплавов и шлаков» (Екатеринбург – Челябинск, Россия, 2001 г.), конференции «Ярмарка инновационных решений для АЭС-2006 и Новой технологической платформы» (Москва, Россия, 2007 г.), XIV международной конференции

«Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, Россия, 2015 г.), международной конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК-2014) (Москва, Россия, 2014 г., научно-технической конференции «Эксперимент-2010» (Нижний Новгород, Россия, 2010 г.), конференции «Инновации в атомной энергетике» (Москва, Россия, 2017, 2019 гг.), международном семинаре «Теплофизические свойства веществ» (Нальчик, Россия, 2001, 2006 гг.), всероссийской научной школе «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Обнинск, Россия, 2010), отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (Подольск, Россия, 2012, 2015 гг.), научно-технической конференции «КОМАНДА» (Санкт-Петербург, Россия, 2013, 2015 гг.), отраслевом семинаре Государственной корпорации «Росатом» «Актуальные вопросы технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей РУ на быстрых нейтронах» (Обнинск, Россия, 2017 г.), Вторых Доллежалевских чтениях (Москва, Россия, 2018 г.), X международной конференции «Физикохимия ультрадисперсных (нано-) материалов» (Анапа, Россия, 2012 г.), XII международной конференции NANO-2014 (Москва, Россия, 2014 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 113 работах, включая 29 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 8 статей в других научных журналах, 65 докладов в сборниках конференций и научных семинаров различного уровня, 11 патентов на изобретения (Российская Федерация).

Личный вклад автора заключается в том, что он как основной исполнитель принимал ведущее участие на всех этапах работ, положенных в основу представленной диссертации: выполнение обзорного анализа существующих методов и средств регулирования содержания примеси растворенного кислорода в циркуляционных контурах и установках с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (Pb, Pb–Bi); формулирование задач экспериментально-расчетных исследований; разработка методик проведения экспериментов; разработка конструкций массообменных аппаратов и методик определения их производительности; разработка технологии изготовления гранул PbO для заполнения МА;

проведение экспериментов на циркуляционных стендах и статических установках с ТЖМТ; обработка опытных данных с получением расчетных зависимостей и построением физических моделей; оформление результатов работ, включая подготовку материалов по массообменным аппаратам для исследовательских стендов и реакторных установок с интегральной компоновкой первого контура со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 197 наименований, приложения. Диссертация представлена на 357 листах, содержит 171 рисунок, 170 формул, 55 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, научная и практическая значимость исследования.

В главе 1 выполнен анализ существующих методов и средств контроля и регулирования содержания примеси растворенного кислорода в циркуляционных контурах и установках с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (Pb, Pb–Bi). При наличии в расплавах свинца и свинца-висмута растворенного кислорода, в связи с меньшим сродством к кислороду свинца и висмута, чем у основных компонентов сталей (железа, хрома), на поверхностях конструкционных сталей жидкометаллического контура и оборудования формируются оксидные пленки. Оксидные пленки имеют структуру Me_xO_y , где Me – Fe, Cr и другие компоненты сталей. Ввиду инертности оксидной пленки относительно жидкометаллической среды, хорошего ее сцепления с матрицей, способности к «залечиванию» дефектов при наличии растворенного кислорода в ТЖМТ, она защищает поверхность конструкционных сталей от прямого контакта с агрессивной жидкометаллической средой, при этом коррозионная стойкость сталей значительно возрастает.

Таким образом, на сегодняшний день основным методом противокоррозионной защиты конструкционных сталей в среде ТЖМТ является кислородная пассивация их поверхностей.

В главе рассмотрены вопросы влияния металлических и оксидных примесей на распределение кислорода в циркулирующем теплоносителе. Из данного рассмотрения следует, что в системе «кислород – железо – свинец» по мере раскисления теплоносителя показания датчиков кислорода переходят от линий изоконцентраций кислорода к линиям, параллельным изоконцентрациям железа, равновесным с растворенным кислородом. Уменьшение концентрации кислорода и увеличение концентрации железа в свинце приводит к тому, что примесь железа начинает определять вид распределения примеси кислорода в раскисленном свинце (рисунок 1).

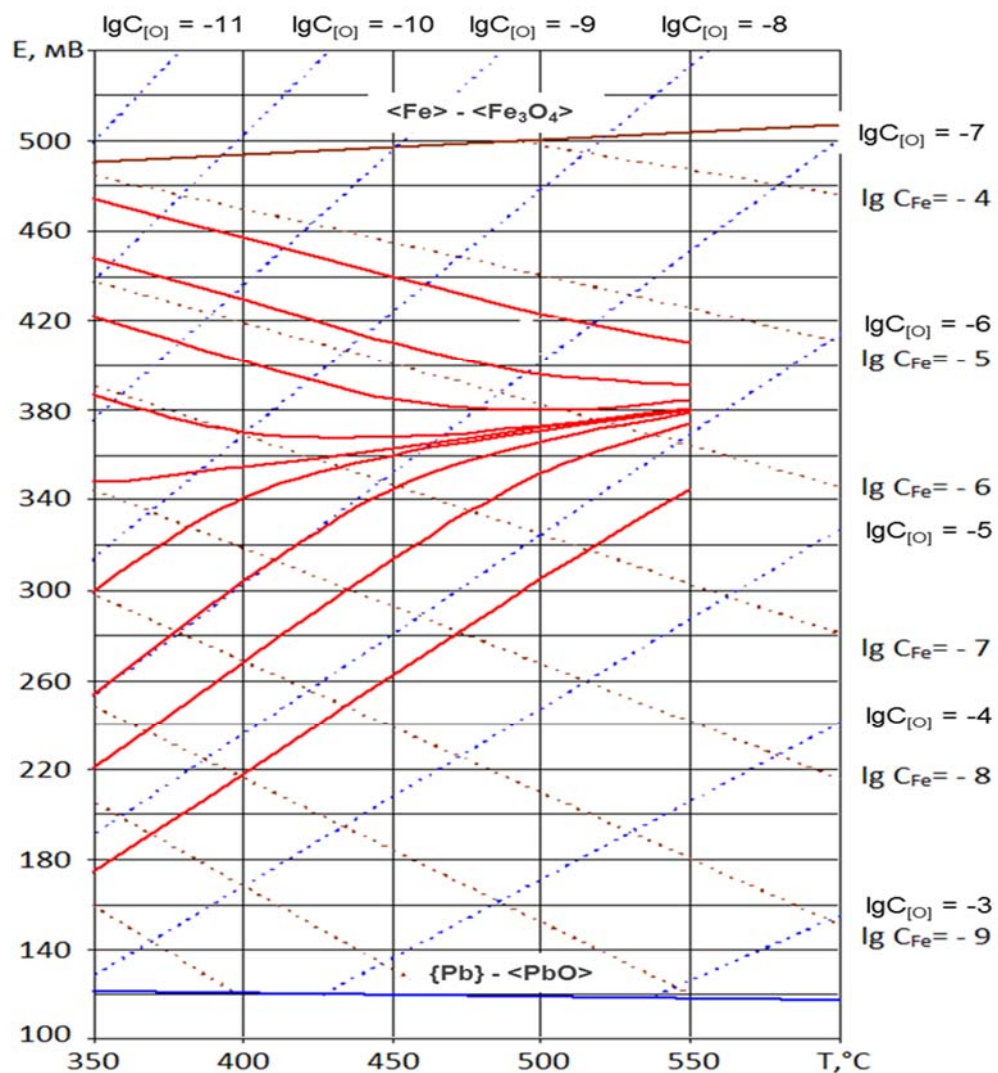


Рисунок 1 – Расчетные показания датчиков ТДА кислорода (электрод сравнения – $Bi-Bi_2O_3$) в свинце

На рисунке 2 приведены показания датчиков активности кислорода, зафиксированные при проведении коррозионных испытаний конструкционных

материалов в циркуляционном контуре со свинцовым теплоносителем. В процессе испытаний происходило «естественное» раскисление теплоносителя вследствие поступления в теплоноситель металлических примесей (компонентов конструкционных материалов). Из рисунка 2 видно, что распределения показаний ДАК, расположенных в различных температурных зонах контура, отличаются от изоконцентрационного.

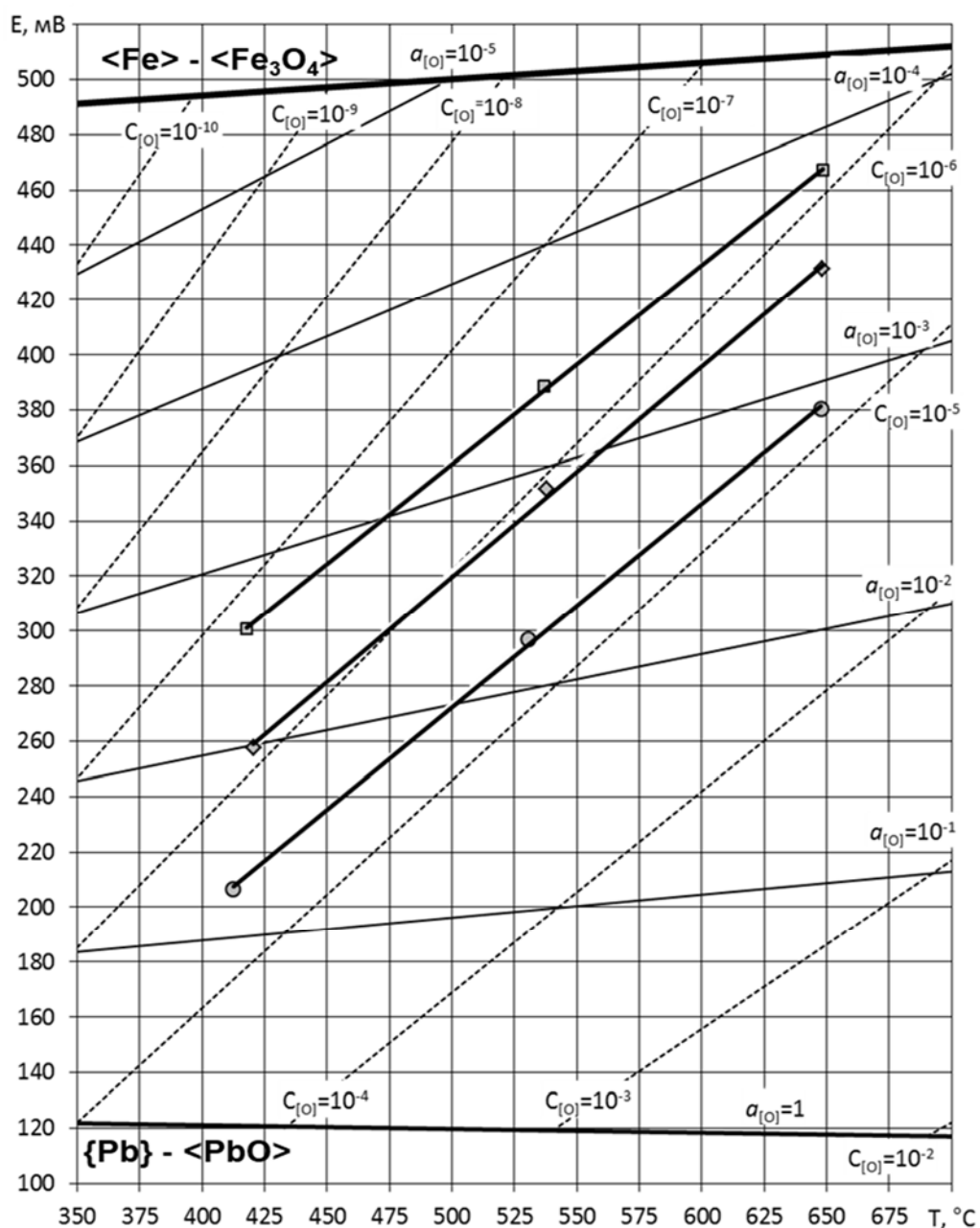


Рисунок 2 – Показания датчиков ТДА кислорода (электрод сравнения – $\text{Bi-Bi}_2\text{O}_3$) при коррозионных испытаниях в свинцовом теплоносителе

На рисунке 3 приведены показания ДАК при раскислении теплоносителя после подачи в него заданной дозы кислорода. Здесь также наблюдается распределение кислорода, существенно отличающееся от изоконцентрационного.

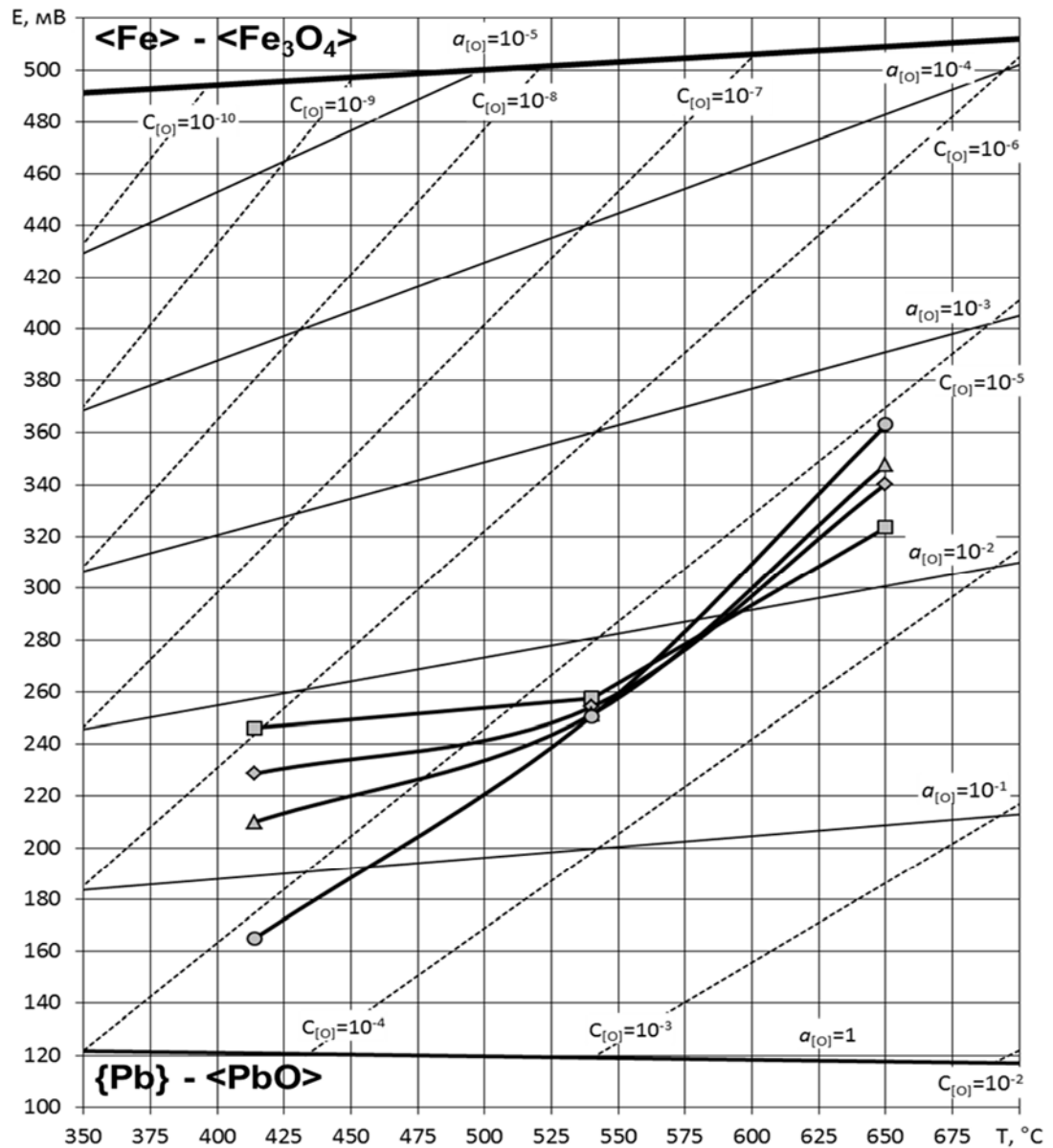


Рисунок 3 – Показания датчиков ТДА кислорода (электрод сравнения – Bi-Bi₂O₃) при раскислении свинцового теплоносителя

Углубленное изучение влияния различных факторов на распределение кислорода в свинецсодержащих теплоносителях привело к результатам, указывающим на возможность неизоконцентрационного распределения кислорода в теплоносителях Pb и Pb-Bi в сравнительно больших контурах различной конструкции и в различных гидродинамических и температурных условиях. Особый интерес представляют данные, полученные в исследованиях

по методикам «быстрого» ($\Delta t / \Delta \tau < 1$ °C/с) и «медленного» ($\Delta t / \Delta \tau > 100$ °C/ч) термоциклирования теплоносителя с заданным содержанием примесей (рисунок 4). Вышеуказанные методики были разработаны для проведения фундаментальных исследований физико-химических свойств свинецсодержащих теплоносителей, содержащих разнообразные взаимодействующие примеси.

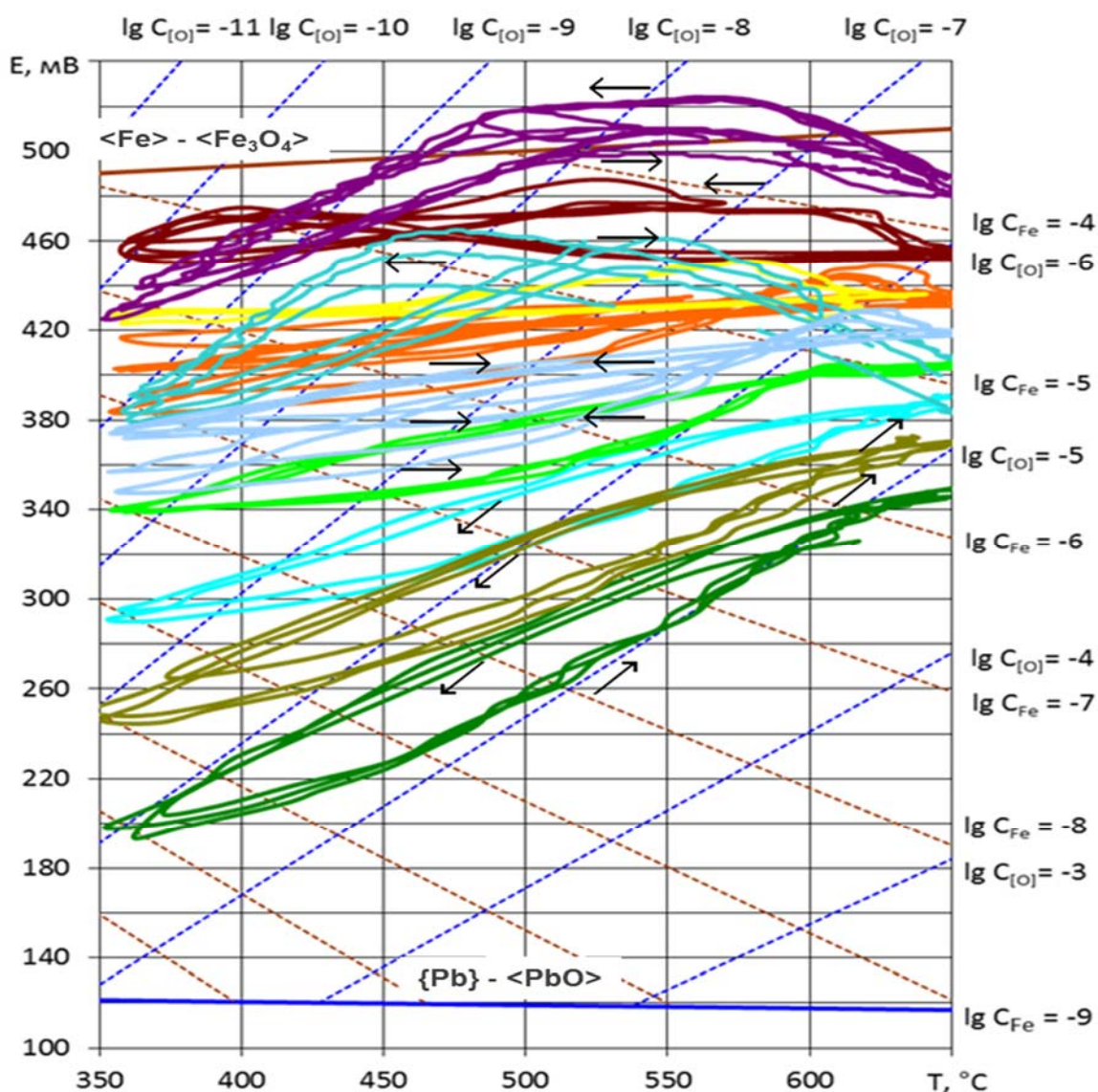


Рисунок 4 – Показания ДАК (электрод сравнения – Vi-Vi₂O₃) при «быстром» термоциклировании свинцового теплоносителя ($\Delta t / \Delta \tau \approx 1$ °C/с)

В результате проведенных исследований экспериментально подтверждена возможность неизоконцентрационного распределения примеси растворенного в теплоносителе кислорода в неизотермическом контуре циркуляции. Экспериментально показано, что в реальном теплоносителе кислород всегда находится как в растворенном виде, так и в виде различных

оксидных образований (вероятнее всего, в растворенном или коллоидном виде). Полученные на лабораторных установках для «быстрого» и «медленного» термоциклирования результаты качественно совпадают с результатами измерений распределений кислорода непосредственно в неизотермическом контуре с тяжелым теплоносителем.

В первой главе выполнен анализ существующих методов контроля термодинамической активности (содержания) растворенного кислорода в свинце (свинце-висмуте). Рассмотрены конструкции электрохимических датчиков с электродами сравнения $\{\text{Bi}-\text{Bi}_2\text{O}_3\}$ и $\{\text{Pb}-\text{Bi}; \text{Fe}-\text{Fe}_3\text{O}_4\}$, рекомендованные для использования в составе исследовательских стендов и реакторных установок. Созданные в ГНЦ РФ – ФЭИ твердоэлектrolитные датчики ТДА кислорода, основанные на электрохимическом методе работы, характеризуются высокой чувствительностью (до $a_{[\text{O}]} = 10^{-6}$), способностью работать длительное время в условиях повышенных температур (до 650 °C) и термоударов (до 20 °C/c), надежностью и стабильностью проводящих и механических свойств в широком интервале температур и парциальных давлений кислорода. В указанной главе отмечено, что современные разработки удовлетворяют требованиям, заложенным в технические проекты ДАК для РУ с ТЖМТ нового поколения. В настоящее время в ГНЦ РФ – ФЭИ завершены работы по обоснованию (подтверждению) ресурса ДАК для РУ «БРЕСТ-ОД-300» и их сертификации (утверждению как средств измерения ТДА кислорода в свинце).

В первой главе рассмотрены достоинства и недостатки существующих методов и средств регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцово-висмутовом и свинцовом теплоносителях. В ходе выполненного анализа возможностей регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ с помощью газовых смесей $\text{He}-\text{O}_2$ ($\text{Ar}-\text{O}_2$) и $\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{He}$ ($\text{H}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{Ar}$) сделаны следующие выводы.

- 1) Введение кислорода в теплоноситель при его обработке газовыми смесями, содержащими кислород ($\text{Ar}-\text{O}_2$, $\text{He}-\text{O}_2$), включает стадию образования твердофазных оксидных фаз компонентов теплоносителя, являющихся

промежуточными продуктами процесса и непосредственными источниками растворенного кислорода.

2) Одной из проблем использования газообразного кислорода или его смеси с инертным газом является низкая эффективность усвоения кислорода теплоносителем, так как образующиеся при контакте газообразного кислорода с теплоносителем твердофазные дисперсные частицы PbO растворяются только частично в жидкометаллической среде за счет эффекта «отравления», заключающегося в образовании на поверхности PbO оксидов железа и оксидов других примесей теплоносителя, поступающих из конструкционных сталей.

3) Другим недостатком метода регулирования кислородного режима теплоносителя посредством подачи газообразного кислорода является риск образования шлаковых отложений в газовых трактах контура, а также на поверхностях раздела «конструкционная сталь — теплоноситель» и «защитный газ — теплоноситель». Это ухудшает теплогидравлику контура циркуляции ТЖМТ, ухудшает нормальную эксплуатацию исследовательских стендов со свинцом (свинцом-висмутом) и первых контуров ЯЭУ с ТЖМТ.

4) Эффективность процесса окисления ТЖМТ газовыми смесями H_2-H_2O-He (H_2-H_2O-Ar) зависит от способа их подачи в контур. Показано, что для удовлетворительной реализации возможностей метода необходима эжекция газовой фазы в поток теплоносителя и ее транспортировка по всему контуру с доставкой в основные узлы, что связано с трудностью транспортировки газовых реагентов в диспергированном виде по всему контуру.

5) Рассмотрены варианты устройств подачи газовых смесей в ТЖМТ (газодувка, барботажное устройство, эжектор, дисковый диспергатор). Все они имеют ограничения по применению и в основном пригодны для небольших стендов. В частности, к числу недостатков применения эжектора (наиболее освоенного устройства для ввода в ТЖМТ смесей $Ar-O_2$, $He-O_2$, H_2-H_2O-He и H_2-H_2O-Ar) следует отнести: негативное воздействие двухфазного потока в ТЖМТ на работу циркуляционного насоса (большие пульсации расхода и тока электродвигателя), инициирование эрозии поверхностей конструкции контура и циркуляционного насоса, сильную вибрацию элементов контура (вентили и т. д.), возможности только периодического использования.

6) К недостаткам использования смесей H_2-H_2O-He (H_2-H_2O-Ar) для регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ следует отнести малую производительность в сравнении с подачей газообразного кислорода, а также ограниченный диапазон регулирования ТДА кислорода.

7) Использование газовой смеси H_2-H_2O-He (H_2-H_2O-Ar) возможно лишь в ограниченном спектре эксплуатационных режимов ЯЭУ и для кратковременного регулирования ТДА в ТЖМТ исследовательских стендов.

Из вышеизложенного также следует, что при применении газофазных методов регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ имеют место или возможны отрицательные побочные явления. Масштабы этих явлений и их возможные последствия таковы, что использование газовых смесей с целью непрерывного регулирования ТДА кислорода не позволяет в полном объеме решить задачу поддержания заданных кислородных режимов в процессе работы установок с ТЖМТ во всех предусмотренных эксплуатационных режимах.

Также в первой главе рассмотрены возможности регулирования ТДА кислорода в свинцовом (свинцово-висмутовом) теплоносителе методом «холодной точки», который также по совокупности своих особенностей не рекомендуется автором для применения в циркуляционных контурах с ТЖМТ.

В главе 1 описан твердофазный метод регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ, разработанный специалистами ГНЦ РФ – ФЭИ с ведущим участием автора настоящей диссертации. В этом методе в качестве средства окисления свинцового (свинцово-висмутового) теплоносителя предложено использование твердофазного оксида свинца, размещаемого и удерживаемого в ограниченном по объему участке циркуляционного контура (реакционной емкости), сообщаемся по расплаву с основным контуром. При этом твердофазное средство окисления (оксид свинца PbO), контактируя с ТЖМТ, растворяется, обогащая расплав кислородом, который далее транспортируется по всему контуру с потоком теплоносителя. Техническая реализация твердофазного метода регулирования осуществляется с помощью специально разрабатываемых устройств – массообменных аппаратов, которые являются важной составной частью комплекса средств технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя.

В главе 2 представлены результаты определения предельной растворимости кислорода в расплаве свинца (свинца-висмута), результаты экспериментально-расчетного исследования кинетики растворения гранул PbO в расплаве свинца в зависимости от температуры и скорости ТЖМТ, числа слоев (высоты засыпки) гранул оксида PbO и результаты экспериментально-расчетного определения зависимости гидравлического сопротивления засыпки гранул PbO от режима прохождения ТЖМТ сквозь нее. Все эти результаты необходимы для создания конструкций МА с заданными значениями производительности (по выдаче растворенного кислорода в теплоноситель) и ресурса работы.

Растворение гранул PbO в предварительно сильно раскисленном расплаве свинца (показания ЭДС ДАК (Е) ~500 мВ) позволяло достигать насыщения расплава по кислороду ($a_{[O]} \sim 1$). В результате обработки экспериментальных данных по определению предельной растворимости кислорода в свинце автором с сотрудниками получена следующая зависимость логарифма концентрации насыщения кислорода в свинце от температуры:

$$\lg C_{S[O]} = 3,438 - 5240/T, \quad (1)$$

где: T – температура, К; размерность $C_{S[O]}$ – % мас.

Значения предельной растворимости кислорода в расплаве свинца, полученные автором в ходе рассмотренного исследования, хорошо согласуются с результатами других ученых (рисунок 5).

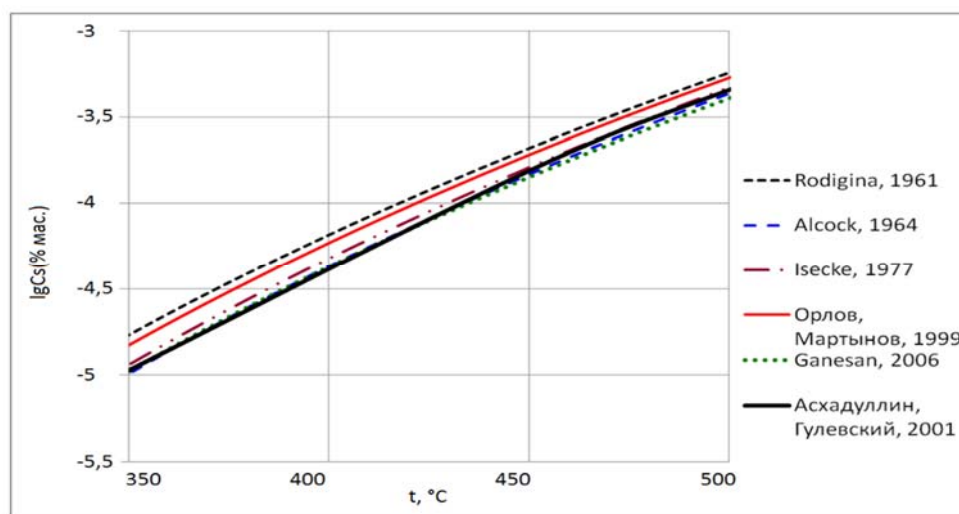


Рисунок 5 – Данные по растворимости кислорода в расплаве свинца, полученные разными авторами

Аналогичная полученная температурная зависимость для растворимости кислорода в эвтектике 44,5 % Pb – 55,5 % Bi имеет вид:

$$\lg C_{S[O]} = 1,18 - 3400/T. \quad (2)$$

В результате экспериментов по изучению взаимодействия раскисленного расплава свинца (в присутствии примеси Fe) с гранулами оксида свинца был установлен эффект «отравления» поверхности гранул железом. При этом глубина слоя взаимодействия оставляет от ~ 0,05 мм до 1 мм в зависимости от времени и условий взаимодействия. Характерное время «отравления» гранул PbO, уменьшающее скорость их растворения в расплаве в ~ 4–5 раз, составляет ~ (150 – 300) мин при погружении гранул в расплав с температурой $T \sim 620^\circ\text{C}$ и уровнем ТДА кислорода, соответствующим показаниям ЭДС ДАК (480 – 460) мВ (диапазон значений ЭДС ДАК специально указывается с больших значений, так как они соответствуют меньшим значениям содержаний или ТДА растворенного кислорода в ТЖМТ).

Во избежание «отравления» гранул PbO примесями свинцового (свинцово-висмутового) теплоносителя в конструкциях МА автор с сотрудниками рекомендовал реализовать так называемый принцип обратной связи. Он заключается в возврате (10 – 15) % окисленного теплоносителя после массообменного аппарата обратно в поток раскисленного расплава, входящего в это устройство. При этом на вход МА поступает уже окисленный до определенного уровня теплоноситель, в котором до взаимодействия с гранулами PbO в объеме массообменного аппарата произведен перевод отравляющих примесей в химически пассивную оксидную форму.

Эксперименты по изучению растворения гранул (сфероидов) PbO в свинцовом теплоносителе циркуляционного стенда «СС-1» (ГНЦ РФ – ФЭИ) проводились в диапазоне температур (400 – 550) °C при скоростях теплоносителя (0,07 – 0,25) м/с. В рабочий участок вводились картриджи, содержащие 1, 4 и 8 слоев гранул PbO. Результаты первого этапа обработки экспериментальных данных представлены на рисунке 6. Из представленных иллюстративных данных следует, что максимальная удельная скорость растворения сфероидов PbO соответствует условиям работы их монослоя. С увеличением количества слоев сфероидов до четырех, уровень значений K_p

(относительно условий для растворения монослоя) уменьшается, а далее, с увеличением числа слоев до восьми, достигаемые значения удельной скорости растворения практически не изменяются. Судя по экспериментальным данным, значения K_p для растворения четырех и восьми слоев сфероидов PbO близки, поэтому автор остановился на обобщении данных, полученных при исследовании кинетики растворения восьмислойного варианта. По мнению автора диссертации, именно эти данные реально отражают работу многослойных стационарных сфероидных засыпок оксида свинца в массообменных аппаратах.

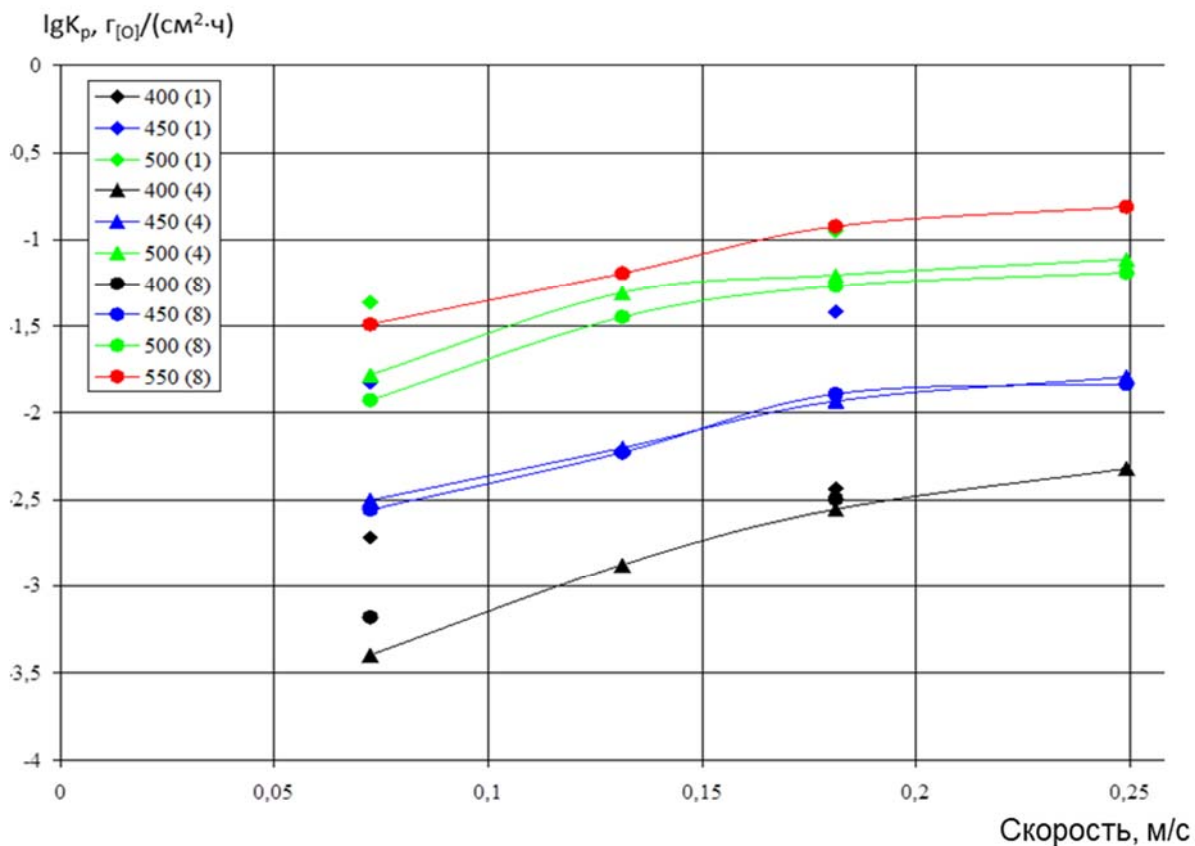


Рисунок 6 – Удельная скорость растворения сфероидов оксида свинца ($K_p, \Gamma_{[O]}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$) в зависимости от температуры, количества слоев (высоты) насыпного материала и скорости обтекания сфероидов

Кинетические характеристики растворения стационарной засыпки оксида свинца в жидком свинце могут быть представлены следующими зависимостями:

$$\lg K_p = a - b / T \text{ (при } w = \text{const}), \quad (3)$$

$$\lg K_p = c - e / w \text{ (при } T = \text{const}), \quad (4)$$

где: a, b, c, e – константы; T – абсолютная температура, К; w – скорость теплоносителя, м/с.

Графически результаты по определению значений удельной скорости растворения гранул PbO в свинцовом теплоносителе в зависимости от скорости теплоносителя через зернистый слой и температуры представлены на рисунке 7.

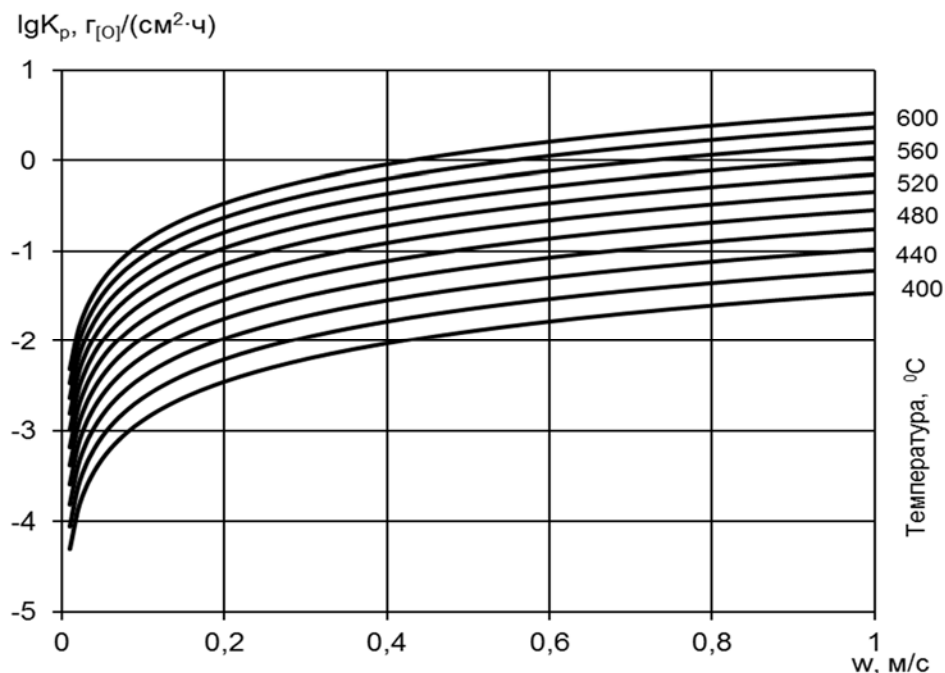


Рисунок 7 – Зависимость удельной скорости растворения гранул (сфероидов) PbO от температуры и скорости свинцового теплоносителя

Дальнейшее обобщение экспериментальных данных по кинетике растворения стационарной засыпки сферических элементов из оксида свинца с целью представления их в виде безразмерного критериального соотношения типа $Sh = A \cdot Re^m \cdot Sc^n$ дает соотношение

$$Sh = 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,42} \cdot Sc^{0,83}, \quad (5)$$

где: $Sh = \frac{\beta \cdot l}{D}$ – число Шервуда; $Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$ – число Рейнольдса; $Sc = \frac{\nu}{D}$ – число

Шмидта; w – скорость теплоносителя, м/с; β – коэффициент массоотдачи, м/с, $\{\beta = q / [\rho \cdot (C_{os} - C_{[O]}) \cdot S_p], \quad \beta = K_p(1 - a_{[O]}) / [\rho(C_{os} - C_{[O]})], \quad q$ – поток кислорода, г/ч, $a_{[O]}$ – термодинамическая активность кислорода, ρ – плотность свинца, г/см³, $C_{[O]}$ и C_{os} – текущая концентрация и концентрация насыщения кислорода в свинце, в массовых долях от 1, S_p – поверхность растворения, см²;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; D – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в свинце, $\text{м}^2/\text{с}$; l – характерный размер, м, $l = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot d_{\text{сф}}}{1 - \varepsilon}$; ε – пористость слоя сфероидов PbO (для слоя сферических частиц принимается равной 0,4); $d_{\text{сф}}$ – диаметр сфероида, м.

Данное соотношение имеет относительную погрешность вычисления $\delta = 30 \%$ при $Re = (1000 - 5000)$, $Sc = (30 - 200)$, температуре свинца до 550°C , его скорости до 1 м/с и активности кислорода в свинце на входе в МА, соответствующей диапазону $a_{[\text{O}]} = n \cdot (10^{-5} - 10^{-2})$.

Впервые проведены экспериментальные исследования в условиях жидкометаллического контура по определению коэффициентов гидравлического сопротивления при прохождении ТЖМТ через засыпку из гранул оксида свинца со скоростями $(0,03 - 0,67) \text{ м/с}$. На основании полученных экспериментальных данных для коэффициентов гидравлического сопротивления (ξ) можно рекомендовать зависимость:

$$\xi = 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot Re_0^{0,28}, \quad (6)$$

где Re_0 – эквивалентный критерий Рейнольдса ($Re_0 = 4 \cdot \frac{w_0}{A \cdot \nu}$, здесь: w_0 – условная скорость теплоносителя, рассчитываемая по полному сечению аппарата (по набегающему потоку), м/с ; A – удельная поверхность слоя засыпки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; ν – кинематическая вязкость теплоносителя, $\text{м}^2/\text{с}$).

При использовании рекомендованной формулы расчета коэффициентов гидравлического сопротивления вычисление гидравлических потерь (ΔP) при прохождении теплоносителя через засыпку гранул PbO рекомендуется проводить по формуле:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{H \cdot A \cdot \rho \cdot w_0^2}{8 \cdot \varepsilon^3}, \quad (7)$$

где: H – высота слоя засыпки, м; ρ – плотность теплоносителя, кг/м^3 ; ε – объемная пористость засыпки.

В главе 3 рассмотрены результаты разработки конструкций массообменных аппаратов для исследовательских стендов и установок с ТЖМТ (малогабаритных (до 10 л) статических установок, экспериментальных

циркуляционных петель и стендов баковой компоновки с загрузкой теплоносителя до 7000 л). Исходя из технических требований к кислородному режиму на конкретной установке (стенде) выбирается тип массообменного аппарата, разрабатываются его конструкция и схема подключения в состав объекта регулирования. При этом необходимо предусмотреть ряд определенных требований, таких как: создание «обратной связи», то есть возвращение части (10 – 15 %) обогащенного кислородом теплоносителя на вход в МА для предотвращения возможности «ожелезнения» сфероидов оксида свинца; предотвращение образования твердой фазы PbO в теплоносителе; предотвращение попадания остатков сфероидов оксида свинца в теплоноситель и др.

Конструкции МА, разработанные при ведущей роли автора данной диссертационной работы, разделяются на несколько основных видов в зависимости от побудителя расхода теплоносителя через реакционную емкость МА (место расположения сфероидов оксида свинца): конструкции, где имеет место создание расхода теплоносителя при такой же температуре, как и в окружающем массообменный аппарат расплаве (регулирование расхода); конструкции, где реализуется создание конвективного расхода теплоносителя за счет его подогрева (регулирование температуры); конструкции, с помощью которых реализуется дозированный ввод порций теплоносителя с относительно повышенной концентрацией растворенного кислорода в больший объем ТЖМТ, где концентрация (или ТДА) кислорода меньше.

С 2000 г. при ведущей роли автора диссертации было разработано 58 массообменных аппаратов, которые испытывались, эксплуатировались и планируются эксплуатироваться на циркуляционных стендах (10 типов МА) и стационарных установках (2 типа МА). При этом была разработана технология получения засыпки МА – твердофазных сфероидов оксида свинца. Список массообменных аппаратов, разработанных для исследовательских стендов с ТЖМТ, приведен в таблице 1. Суммарное время работы всех МА составляет более 75 000 ч.

Таблица 1 – Хронологический перечень массообменных аппаратов, поставленных в опытную эксплуатацию на стенды с ТЖМТ различных организаций

№	Стенд (организация)	Название МА	Загрузка М _{РЬО} , кг	Год уста- новки	Тип*
1	2	3	4	5	6
1	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-3	4,084	2001	3 ВН
2	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-2	0,74	2002	1 ВН
3	«СМ-2» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-1	0,85	2000	1 ВН
4	«СМ-2» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-1М	0,85	2001	1 ВН
5	«СМ-2» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-2	4,492	2001	3 ВН
6	«СМ-2» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-02-01	1,734	2002	1 ВН
7	«ЦУ-1» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-02-02	1,65	2002	1 ВН
8	«СМ-2» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-02-03	1,7	2003	1 ВН
9	«Х5» (ЦНИИ КМ «Прометей»)	МА-1М	1,2	2001	1 ВН
10	«РУ КИ» (НИКИЭТ)	МА-К-01	0,011	2002	К
11	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-03-01	1,995	2003	1 ВН
12	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-03-02	11,4	2003	ОН
13	«РУ КИ» (НИКИЭТ)	МА-К-02	0,0207	2003	К
14	«СМ-1» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-03-03	1,400	2003	1 ВН
15	«Х5» (ЦНИИ КМ «Прометей»)	МА-03-04	1,400	2003	1 ВН
16	«Х-6» (ЦНИИ КМ «Прометей»)	МА-03-05	1,400	2003	1 ВН
17	«УПСТ» (Свердловский филиал НИКИЭТ (сейчас ИРМ))	МА-РП-01	1,0	2003	НН
18	«РУ КИ» (НИКИЭТ)	МА-К-03	0,0135	2003	К
19	«РУ ТТ-3» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ГЛ-04/1	0,0389	2004	ГЛ
20	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-04-01	1,720	2004	ОН
21	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-04-02	1,52	2004	1 ВН
22	«РУ КИ» (НИКИЭТ)	МА-К-04	0,01369	2005	К
23	«РУ КИ» (НИКИЭТ)	МА-К-05	0,01523	2005	К
24	«РУ КИ» (НИКИЭТ)	МА-К-06	0,01428	2005	К
25	«РУ ТТ-3» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ГЛ-02	0,0084	2005	ГЛ
26	«РУ ТТ-3» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ГЛ-03	0,0084	2005	ГЛ

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
27	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ГЛ-04	~ 1,5	2005	ГЛ
28	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ДП-1	5,94	2006	ДП
29	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МАкомби	1,81	2006	ОН+ВН
30	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ДП-2	~12	2007	ДП
31	CIRCE (ENEA, Италия)	МА-ДП-3	~12	2007	ДП
32	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	Проточный	2,185	2007	РУ
33	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ДП-4	~ 6	2008	ДП
34	«РУ ТТ-3» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ДП-5	0,1	2008	ДП
35	«Х5» (ЦНИИ КМ «Прометей»)	МА-4 №1	1,860	2011	НН
36	«Х6» (ЦНИИ КМ «Прометей»)	МА-4 №2	2,020	2011	НН
37	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА БРЕСТ	17,3	2011	ОН
38	«ТТ-1М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА СВБР/1 (макет)	11,91	2012	1 ВН
39	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА СВБР/2 (макет)	~ 4,0	2012	1 ВН
40	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА СВБР/3 (макет)	9,9	2013	1 ВН
41	«ЭУСТ» (НИКИЭТ)	МА-ДП-6	10,0	2013	ДП
42	«ЭУСТ» (НИКИЭТ)	МА-ДП-7	10,0	2013	ДП
43	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА СВБР/4 (макет)	10,35	2013	1 ВН
44	«СПРУТ» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ДП-8	8,9	2013	ДП
45	«БГС» (ЦКБМ)	МА-ДП-9	9,1	2013	ДП
46	«БГС» (ЦКБМ)	МА-ДП-10	8,9	2013	ДП
47	«Х2» (ЦНИИ КМ «Прометей»)	МА-ДП-11	3,4	2013	ДП
48	«Х3» (ЦНИИ КМ «Прометей»)	МА-ДП-12	4,0	2013	ДП
49	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА с клапа- ном (макет)	7,0	2013	БРЕСТ
50	НИКИЭТ	МАК-1	~1,0	2013	НН
51	«УПСТ» (ИРМ)	МАК-2	0,5	2013	НН
52	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ОН-1	10,0	2013	ОН
53	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	МА-ОН-2	11,4	2013	ОН
54	«БРЕСТ» (ЦКБМ)	МА-ОН-3	~ 15	2014	ОН

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
55	«БРЕСТ» (ЦКБМ)	МА-ОН-4	~ 15	2014	ОН
56	«ТТ-2М» (ГНЦ РФ – ФЭИ)	Проточный	8,6	2014	П
57	«ФТ-4» (НГТУ)	МА-ДП-13	~10	2014	ДП
58	ЭТГС (НИТИ)	МА с регулирующим клапаном	30	2024	ПА

* Расшифровка условных обозначений типов массообменных аппаратов: ВН – конвекционный с внутренним нагревателем; К – капельный; ОН – с осевым насосом; НН – конвекционный с наружным нагревателем; ГЛ – с газлифтным насосом; ДП – с дискретной подачей газовой среды; П – проточный с ручным управлением; ПА – проточный с автоматическим управлением.

Автором сформулирована концепция автоматизированного регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ с использованием МА, выбран необходимый состав системы автоматизированного регулирования (САР) ТДА кислорода в ТЖМТ, разработана её структура. Для автоматизированного управления содержанием кислорода в ТЖМТ в САР ТДА кислорода может быть применен достаточно распространенный тип автоматического регулятора с обратной связью – ПИД-регулятор. В главе 3 показано, что с помощью САР ТДА кислорода возможна индикация состояния поверхностей конструкционных сталей и оборудования первого контура ЯЭУ или циркуляционного контура с ТЖМТ без прекращения циркуляции теплоносителя, которая основывается на контроле скорости потребления кислорода контуром.

В главе 4 представлены результаты разработки и обоснования конструкции МА для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в реакторной установке с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя Pb-Bi до 30 м³.

Автором выполнена оценка требований к производительности МА и запасу кислорода для четырехпетлевой РУ с размещением МА на каждой из петель циркуляции, при этом получен следующий набор требований к МА: максимальная производительность МА (в первый год эксплуатации) $q_{\max} \geq 1$ г[О]/ч; производительность МА после первого года эксплуатации РУ $q_{\text{МА}} \geq 0,15$ г[О]/ч; масса запаса оксида свинца в каждом МА $m_{\text{РbO}} > 18,3$ кг.

Для выбора типа массообменного аппарата выполнен расчет параметров МА для трех устройств погружного типа: МА с внутренним нагревателем; МА с дискретной подачей газовой среды; МА с приводом (перемещаемый).

Оценочные расчеты производительности для каждой из рассматриваемых конструкций МА были выполнены по методике, разработанной при ведущем участии автора и описанной в соответствующих публикациях. Результаты этих оценочных расчетов приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Результаты расчета производительности МА разных конструкций

Параметр	Значения		
МА с нагревателем			
Режим работы (мощность нагревателя), кВт	1	3	5
Подогрев, °С	57	114	155
Расход теплоносителя, кг/с	0,12	0,18	0,22
Производительность по кислороду, г[О]/ч	0,33	0,82	1,41
МА с дискретной подачей газовой среды			
Режим работы (частота подачи порций), циклов/ч	10	20	30
Время между циклами, мин	6	3	2
Расход теплоносителя, кг/с	0,07	0,14	0,22
Производительность по кислороду, г[О]/ч	0,14	0,27	0,41
МА с приводом (перемещаемый МА)			
Перепад давления теплоносителя, Па	500	1500	2500
Расход теплоносителя, кг/с	0,23	0,38	0,47
Производительность по кислороду, г[О]/ч	0,32	0,48	0,58

Таблица 3 – Результаты оценки запаса оксида свинца и ресурса МА

Тип МА	Масса оксида свинца в МА, кг	Ресурс (при $q_{\text{МА}} = 0,15$ г _[O] /ч), лет
МА с внутренним нагревателем	17,42	0,95
МА с дискретной подачей газовой среды	27,46	1,50
МА с приводом (перемещаемый)	28,57	1,56

Из сопоставления полученных значений производительности массообменного аппарата с результатами оценки требований к МА в первый год эксплуатации и после первого года эксплуатации следует, что только

массообменный аппарат с нагревателем удовлетворяет требованиям по максимальной производительности. Остальные массообменные аппараты удовлетворяют требованиям к производительности после первого года эксплуатации МА, т. е. после доформирования защитных оксидных пленок на поверхностях конструкционных сталей и снижения потребления кислорода первым контуром РУ.

Из результатов выполненных расчетов следует, что для начального этапа эксплуатации РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем актуально использовать конструкцию массообменного аппарата с внутренним нагревателем. Данная конструкция МА имеет наибольшую производительность, но меньший запас кислорода по сравнению с другими рассмотренными конструкциями.

Производительность массообменного аппарата является в данном случае определяющим параметром для РУ, так как её должно быть достаточно для поддержания заданного кислородного режима. Запас кислорода не является критическим параметром, поскольку МА является заменяемым оборудованием. Кроме того, возможно увеличение запаса кислорода в массообменном аппарате путем увеличения нижней части устройства. По мере срабатывания (растворения) гранул оксида свинца в рабочей зоне реакционной емкости (в зоне греющей части нагревателя) гранулы из нижней части будут всплывать, так как имеют меньшую плотность по сравнению со свинцом-висмутом, и обеспечивать подпитку рабочей зоны оксидом свинца.

В главе 4 описаны результаты экспериментальных исследований параметров МА с внутренним нагревателем. Экспериментальные исследования параметров массообменного аппарата с внутренним нагревателем выполнены с использованием макетного образца МА на неизотермическом циркуляционном стенде «ТТ-2М» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») с теплоносителем свинец-висмут. Схема данного массообменного аппарата представлена на рисунке 8.

Результаты испытаний макетного образца МА с пошаговым подъемом мощности нагревателя с 1,3 кВт до 4 кВт представлены на рисунке 9.

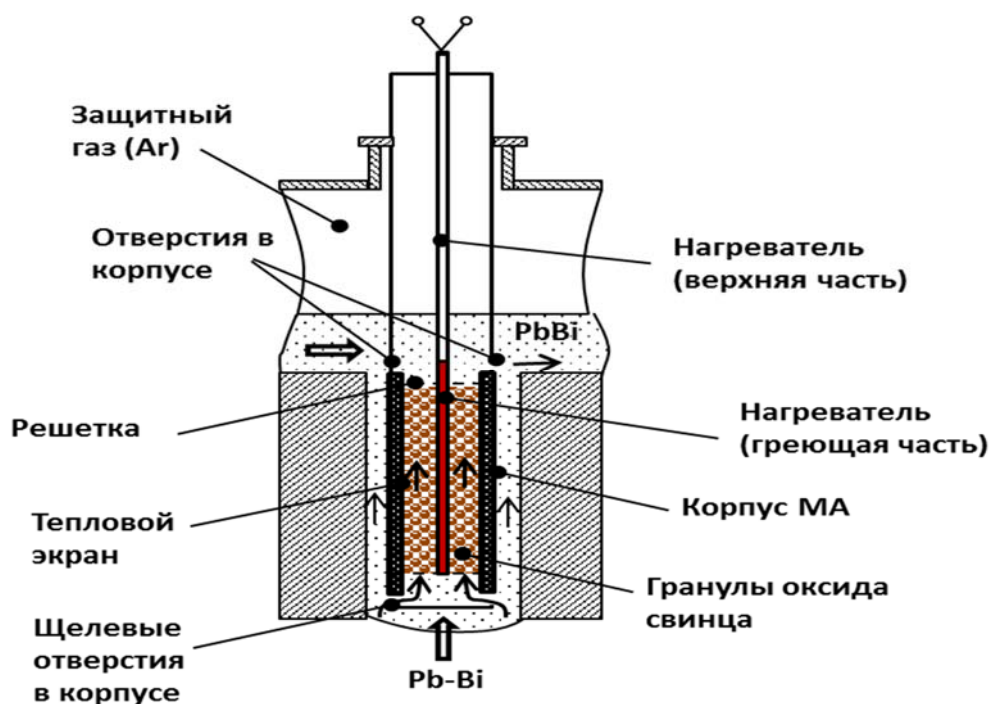
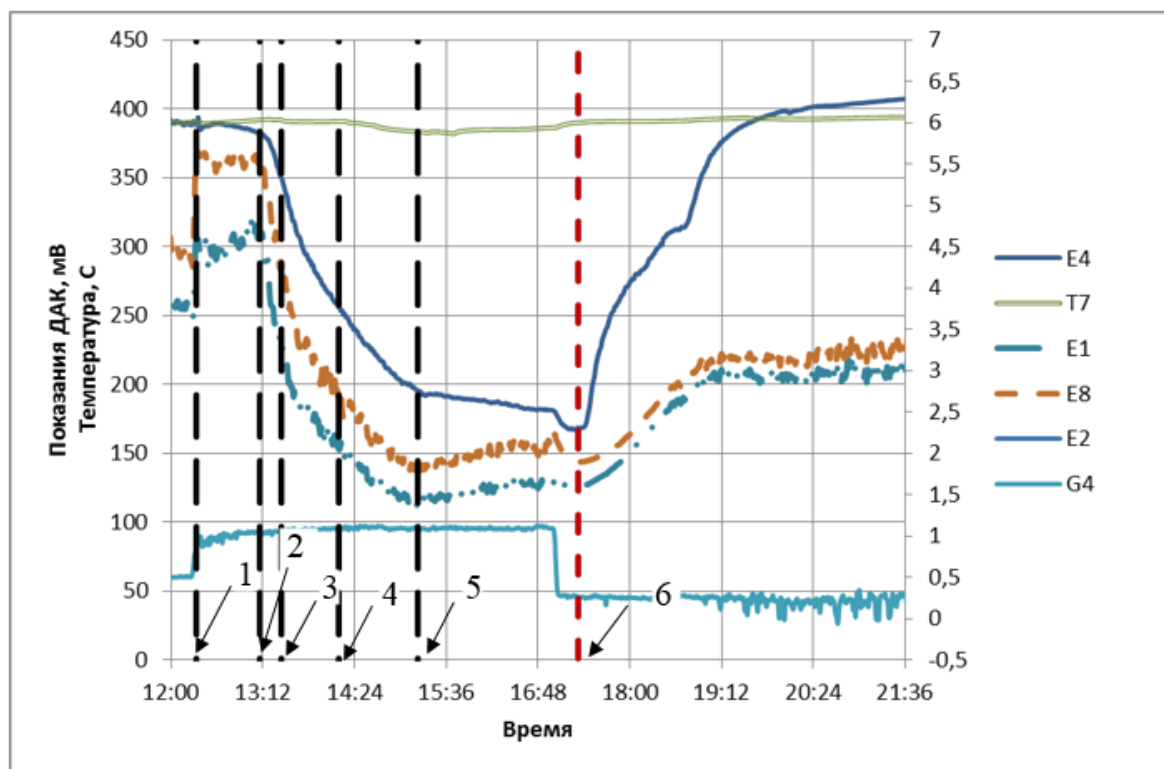


Рисунок 8 – Схема макетного образца МА с внутренним нагревателем



- 1 – установили поперечный расход ($0,9 - 1,0$) $\text{м}^3/\text{ч}$; 2 – включили нагреватель МА и установили мощность $P = 1,3$ кВт; 3 – установили мощность нагревателя $P = 3,2$ кВт;
 4 – установили мощность нагревателя $P = 4$ кВт; 5 – выключили нагреватель МА;
 6 – установили эжекцию аргоно-водородной смеси в теплоноситель

Рисунок 9 – Изменение параметров при экспериментах с макетным образцом МА (стенд «ТТ-2М», эксперимент 04.03.2013)

В результате проведенных исследований было показано, что макетный образец массообменного аппарата с внутренним нагревателем работоспособен и позволяет обеспечить приемлемую производительность по кислороду (соответствующую расчетным оценкам).

На основании выполненных работ можно рекомендовать требование к номинальной мощности нагревателя МА –4 кВт. При этом номинальная производительность массообменного аппарата составит $(1,3 \pm 0,4) \text{ г}_{\text{[O]}}/\text{ч}$.

В главе 5 представлены результаты разработки и обоснования конструкции МА для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в реакторной установке с интегральной компоновкой первого контура и объемом свинцового теплоносителя до 1000 м^3 .

Автором определены типовые технические требования к конструкции и характеристикам массообменного аппарата. Учитывая компоновку РУ, выбор конструкций МА ограничивается устройствами погружного типа.

Из конструкций массообменных аппаратов для РУ рассматривались:

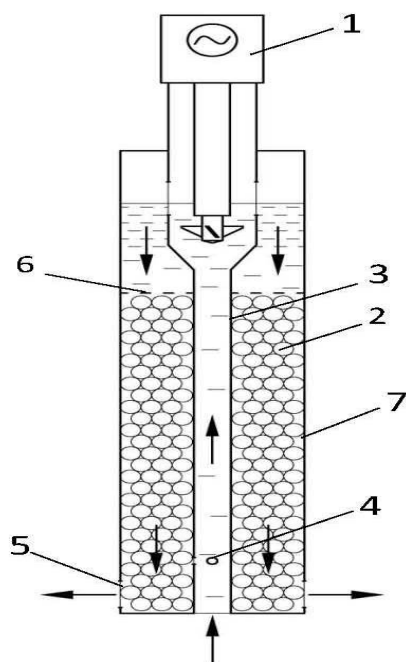
- МА с внутренними нагревателями погружного типа;
- МА с регулятором типа «Игла»;
- МА с дискретной подачей газовой среды;
- МА со встроенным насосом;
- МА с регулировочным клапаном.

По совокупности параметров автором рекомендуется конструкция массообменного аппарата со встроенным насосом. Принципиальная схема рекомендуемого МА приведена на рисунке 10.

Результаты расчета количества оксида свинца в массообменных аппаратах для четырехпетлевой РУ (с размещением МА на каждой из петель циркуляции теплоносителя) представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты вычислений массы оксида свинца, содержащегося в МА

Объем емкости МА ($V_{\text{МА}}$), л	Масса оксида свинца (m_{PbO}), кг	Масса кислорода (m_{O}), кг	Общая масса оксида свинца (в 4 МА), кг	Общий запас кислорода (в 4 МА), кг
660	3000	210	12 000	840



- 1 – насос, 2 – засыпка из оксида свинца, 3 – подводящая труба,
4 – отверстия в подводящей трубе, 5 – выходные отверстия,
6 – решетка, 7 – корпус

Рисунок 10 – Принципиальная схема массообменного аппарата для РУ с Рб и интегральной компоновкой первого контура

Исходя из результатов расчетов автора, для пассивации поверхностей сталей первого контура РУ при создании на них защитной оксидной пленки средней толщиной 1 мкм потребуется порядка 392,1 кг оксида свинца.

Из выполненных оценок следует, что в четырех МА РУ с объемом теплоносителя до 1000 м³ может быть размещена масса оксида свинца (до 12 тонн), значительно превышающая запас, необходимый как для проведения пассивации поверхностей конструкционных сталей, так и для дальнейшего поддержания кислородного режима. Исходя из предварительных оценок интенсивности потребления кислорода первым контуром для обеспечения «базового» кислородного режима $C_O = (1-4) \cdot 10^{-6} \% \text{ мас.}$ при поверхностях конструкционных сталей первого контура $\sim 20000 \text{ м}^2$, 4 МА должны обеспечить производительность по кислороду не менее 175 г_[O]/ч, т. е. производительность каждого МА должна составлять не менее 44 г_[O]/ч. Из расчетов характеристик массообменного аппарата, выполненных автором, следует, что при высоте реакционной емкости МА 1 м производительность при расходе теплоносителя 10 м³/ч и температуре 420 °С может достигать $q_{[O]} \approx 97 \text{ г/ч.}$ Высота

реакционной емкости выбрана, исходя из результатов исследования изменения концентрации кислорода по высоте слоя засыпки PbO в МА, представленных на рисунке 11.

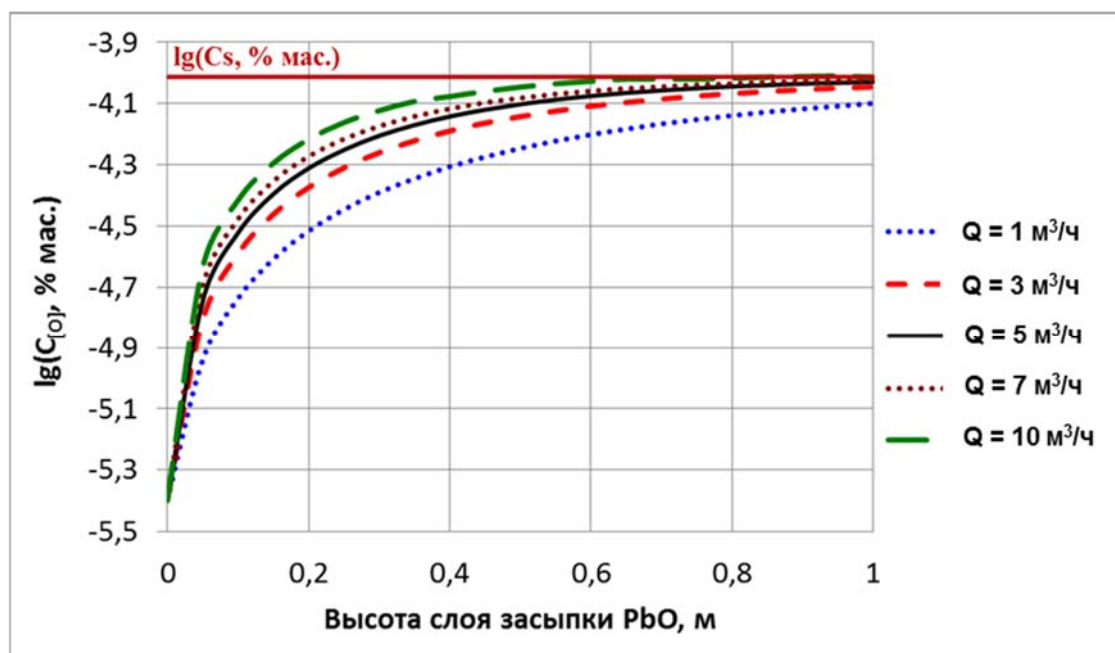


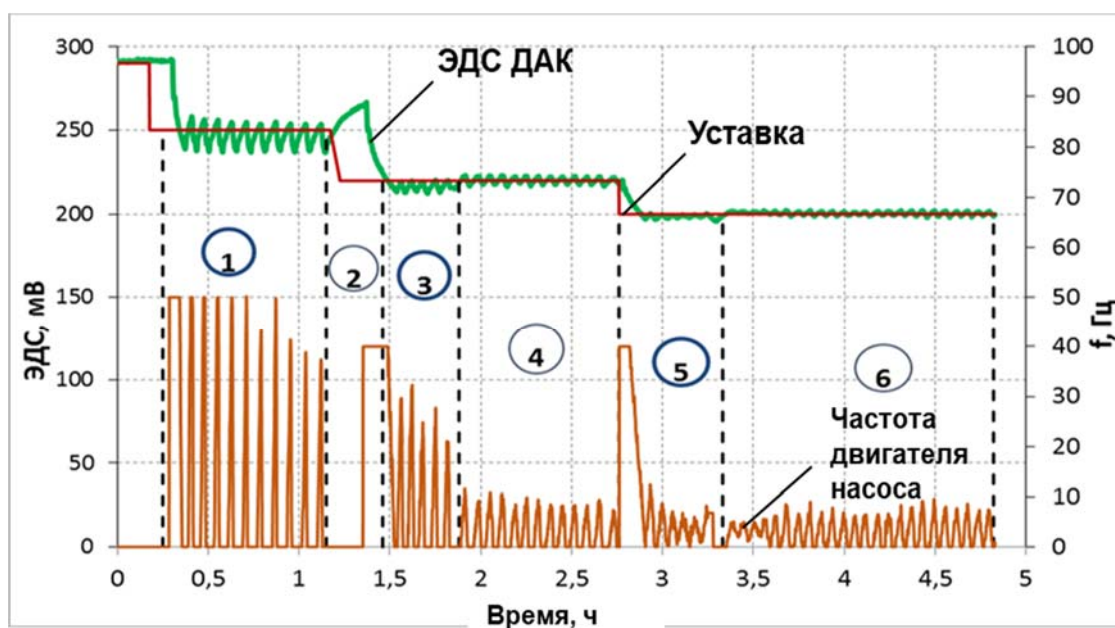
Рисунок 11 – Изменение концентрации кислорода по высоте слоя засыпки PbO в МА при температуре 420 °С и различных расходах теплоносителя

Конструкционные материалы массообменного аппарата находятся в условиях, отличающихся от условий работы конструкционных сталей остального контура. В МА наличие засыпки оксида свинца обеспечивает концентрацию растворенного кислорода на уровне насыщения (предельной растворимости кислорода) в отличие от сталей контура, для которых рассматривается базовый кислородный режим $C_O = (1 - 4) \cdot 10^{-6} \% \text{ мас.}$ Таким образом, элементы конструкции МА будут в процессе эксплуатации контактировать с теплоносителем с повышенным содержанием кислорода.

Исходя из результатов расчетов, выполненных автором, прибавка на сплошную коррозию к толщинам стенок, находящихся в контакте с предельно насыщенным кислородом свинцом при температуре 420 °С, может быть принята за срок эксплуатации МА 25 0000 ч равной 0,13 мм. Таким образом, есть все основания принять назначенный срок эксплуатации невыемных элементов МА (с толщиной стенки 5 мм) равным 30 годам.

Работоспособность конструкции МА со встроенным насосом подтверждается результатами испытаний макетных образцов.

В ходе испытаний макетного образца массообменного аппарата в автоматическом режиме выявлено, что на точность поддержания заданной установки существенно влияют параметры ПИД-регулятора системы управления. Графики изменения технологических параметров при испытаниях макетного образца МА в автоматическом режиме в неизотермическом режиме на стенде «ТТ-2М» представлены на рисунке 12.



Зона 1. Выход на заданную уставку 250 мВ, что соответствует значению концентрации кислорода в теплоносителе $C_{[O]} = 3,5 \cdot 10^{-7} \% \text{ мас.}$, и поддержание данной уставки. Коэффициенты регулирования: $K_c = 7,5$; $T_i = 200$; $T_D = 0$.

Зона 2. Участок раскисления теплоносителя и выход на уставку 220 мВ, что соответствует значению концентрации кислорода в теплоносителе $C_{[O]} = 10^{-6} \% \text{ мас.}$

Зона 3. Поддержание уставки 220 мВ без изменения коэффициентов регулирования.

Зона 4. Поддержание уставки 220 мВ с измененными коэффициентами регулирования: $K_c = 7,5$; $T_i = 400$; $T_D = 0$.

Зона 5. Переход на уставку 200 мВ, что соответствует значению концентрации кислорода в теплоносителе $C_{[O]} = 2 \cdot 10^{-6} \% \text{ мас.}$, и поддержание данной уставки. Коэффициенты регулирования не менялись.

Зона 6. Поддержание уставки 200 мВ с измененными коэффициентами регулирования: $K_c = 7,5$; $T_i = 450$; $T_D = 0$.

Рисунок 12 – Графики изменения технологических параметров при испытаниях макетного образца МА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ)

1. Цель работы, заключающаяся в разработке устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в ТЖМТ, их изготовлении, испытаниях, адаптации к технологическим процессам, поставке в составе систем технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя (свинец, свинец-висмут) на многочисленные исследовательские стенды для обеспечения технологии тяжелого теплоносителя и проведения длительных ресурсных испытаний конструкционных сталей и изделий (компонентов) жидкометаллических контуров проектируемых реакторных установок «БРЕСТ-ОД-300», «СВБР-100», «БР-1200», «МАСММ», а также в принципиальной разработке и обосновании конструкций массообменных аппаратов для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцово-висмутовом и свинцовом теплоносителях перспективных реакторных установок гражданского назначения, достигнута.

2. Выполнен анализ существующих методов контроля и регулирования примеси растворенного кислорода в циркуляционных контурах и установках с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (Pb, Pb-Bi). Электрохимический метод контроля кислорода, реализуемый с помощью датчиков активности кислорода, является наиболее подходящим для промышленных и исследовательских установок с ТЖМТ. Показано, что ранее разработанные для АПЛ и петлевых исследовательских установок методы регулирования кислородного потенциала в свинце-висмуте (введение в ТЖМТ газовых смесей, содержащих кислород или водяной пар, метод «холодной точки») малоэффективны или неприемлемы для промышленных реакторных установок нового поколения. Обоснована необходимость разработки твердофазного метода регулирования ТДА кислорода в свинце (свинце-висмуте), заключающегося в регулируемом растворении гранул PbO в ТЖМТ и отличающегося от ранее освоенных методов большей производительностью и управляемостью. Также обоснована необходимость разработки специальных устройств (массообменных аппаратов) для реализации данного метода.

3. Проведены физико-химические исследования в обоснование применения твердофазного метода для регулирования содержания (ТДА) примеси

растворенного кислорода в свинцовом (свинцово-висмутовом) теплоносителе. Экспериментально-расчетно уточнены температурные зависимости растворимости кислорода в расплавах свинца и свинца-висмута. Автором получена температурная зависимость логарифма концентрации насыщения кислорода в свинце: $\lg C_{S[O]} = 3,438 - 5240/T$. Аналогичная температурная зависимость для растворимости кислорода в эвтектике 44,5 % Pb – 55,5 % Bi имеет вид: $\lg C_{S[O]} = 1,18 - 3400/T$. Получена эмпирическая зависимость в виде безразмерного критериального соотношения, характеризующая кинетику растворения в расплаве свинца стационарной засыпки гранул из PbO. Критериальное соотношение имеет вид: $Sh = 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,42} \cdot Sc^{0,83}$. Данное соотношение имеет относительную погрешность вычисления $\delta = 30\%$ при $Re = 1000 - 5000$, $Sc = 30 - 200$, температуре свинца до 550 °С, его скорости до 1 м/с и термодинамической активности кислорода в Pb на входе в МА, соответствующей диапазону $a_{[O]} = n \cdot (10^{-5} - 10^{-2})$. Полученное соотношение позволяет выполнить оценку потока кислорода с поверхности слоя гранул PbO массообменного аппарата и определить его производительность по кислороду. Выполнены экспериментальные исследования в условиях жидкометаллического контура по определению коэффициентов гидравлического сопротивления при прохождении ТЖМТ через засыпку из гранул оксида свинца в диапазоне скоростей (0,03 – 0,67) м/с. На основании полученных экспериментальных данных для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления рекомендована зависимость: $\xi = 5,8 \cdot 10^{-2} \cdot Re_0^{0,28}$.

4. Осуществлены разработка и обоснование конструкций массообменных аппаратов для исследовательских стендов и установок с теплоносителями Pb, Pb-Bi. Разработана методика расчетно-экспериментального определения производительности массообменных аппаратов с различными побудителями расхода ТЖМТ через МА. Всего создано 58 массообменных аппаратов (со встроенными и внешними нагревателями, осевыми и газлифтными насосами, дискретной подачей газовой среды, капельного типа), которые испытывались, эксплуатировались и планируются к эксплуатации на циркуляционных стендах (10 типов МА) и стационарных установках (2 типа МА) в ГНЦ РФ – ФЭИ, ЦНИИ КМ

«Прометей», НИКИЭТ, ЦКБМ, ИРМ, НГТУ, ENEA (Италия), НИТИ. Суммарное время работы всех массообменных аппаратов составило более 75 000 ч. Сформулирована концепция и структура автоматизированной системы регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ и выполнены комплексные исследования на неизотермическом циркуляционном контуре с ТЖМТ по отработке автоматизированного поддержания заданного кислородного режима в теплоносителе, используя массообменный аппарат и датчики термодинамической активности кислорода. Экспериментально доказано, что для автоматизированного регулирования содержания кислорода в ТЖМТ в САР ТДА могут быть применены распространенные типы автоматических регуляторов с обратной связью (ПИД-регулятор, двухпозиционный (релейный) регулятор). Предложен способ индикации развития коррозионно-эрозионных процессов в циркуляционных контурах с ТЖМТ с помощью САР ТДА, который основывается на контроле скорости потребления кислорода контуром при эксплуатации.

5. Выполнены разработка и обоснование конструкции массообменного аппарата для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцово-висмутовом теплоносителе реакторных установок гражданского назначения (с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя в нем до 30 м³). Проведенные испытания позволили подобрать конструкцию массообменного аппарата со встроенным нагревателем, которая обеспечивает осуществление регулируемого ввода в теплоноситель растворенного кислорода с производительностью $(1,3 \pm 0,4)$ г_[O]/ч при мощности нагревателя 4 кВт.

6. Осуществлены разработка методологии и обоснование конструкции массообменного аппарата для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцовом теплоносителе реакторных установок малой и средней мощности (с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя в нем до 1000 м³). Определены требования к высоте слоя засыпки из гранул оксида свинца и расходу теплоносителя через реакционную емкость массообменного аппарата, обеспечивающему приемлемую производительность МА по кислороду. Для обеспечения

производительности МА по кислороду $q_{[O]} = (45 \pm 10) \text{ г}_{[O]}/\text{ч}$ расход теплоносителя через рассматриваемое устройство должен быть не менее $5,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ при температуре теплоносителя 420°C и высоте слоя засыпки из гранул PbO не менее 1 м.

Задачи диссертационной работы решены в полном объеме. Материалы диссертации использованы не только для обеспечения экспериментальных исследований на многочисленных стендах и установках, но и в технических проектах массообменных аппаратов для создаваемых РУ «БРЕСТ-ОД-300», «СВБР-100», технологических регламентах работы поставляемых ГНЦ РФ – ФЭИ массообменных аппаратов для отечественных и зарубежных исследовательских циркуляционных стендов с ТЖМТ. Оформлен Акт внедрения результатов диссертационной работы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах из перечня ВАК:

1. Апальнов, Е.А. Подходы к выбору конструкций массообменного аппарата с твердофазным источником растворенного кислорода для установок с ТЖМТ / Е.А. Апальнов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких, Т.В. Махова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2024. – № 2. – С. 269–279. (Вклад соискателя – 45 %).
2. Асхадуллин, Р.Ш. Научно-технические достижения в области технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких, Р.П. Садовничий и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 3. – С. 178–196. (Вклад соискателя – 50 %).
3. Асхадуллин, Р.Ш. Современное состояние и задачи разработок по технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (Pb , Pb-Bi) / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких, В.В. Ульянов, И.А. Воронин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – № 2. – С. 105–115. (Вклад соискателя – 60 %).

4. Иванов, К.Д. Исследование диффузионного выхода железа из стали ЭП823 в расплав свинца / К.Д. Иванов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.А. Осипов, С.-А.С. Ниязов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – № 3. – С. 117–126. (Вклад соискателя – 35 %).

5. Асхадуллин, Р.Ш. Разработка и обоснование конструкций массообменных аппаратов для регулирования окислительного потенциала в свинцово-висмутовом теплоносителе реакторных установок нового поколения / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – № 2. – С. 173–183. (Вклад соискателя – 70 %).

6. Асхадуллин, Р.Ш. Расчетная оценка изменения производительности массообменного аппарата за счет расходования запаса кислорода / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – № 1. – С. 152–160. (Вклад соискателя – 65 %).

7. Асхадуллин, Р.Ш. Обеспечение технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя в реакторных установках нового поколения / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Н. Стороженко, В.П. Мельников и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – № 4. – С. 89–103. (Вклад соискателя – 55 %).

8. Асхадуллин, Р.Ш. Современное состояние разработок датчиков активности кислорода для реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Н. Стороженко, В.М. Шелеметьев и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – Специальный выпуск. – С. 12–19. (Вклад соискателя – 35 %).

9. Асхадуллин, Р.Ш. Методы регулирования содержания кислорода в ТЖМТ / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Н. Стороженко, А.Ю. Легких // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – Специальный выпуск. – С. 32–43. (Вклад соискателя – 60 %).

10. Лаврова, О.В. Распределение кислорода в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе при его циркуляции по неизотермическому

контуру / О.В. Лаврова, К.Д. Иванов, С.В. Салаев, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – № 3. – С. 89–99. (Вклад соискателя – 20 %).

11. Асхадуллин, Р.Ш. Контроль и регулирование кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях для противокоррозионной защиты сталей / **Р.Ш. Асхадуллин**, П.Н. Мартынов, В.И. Рачков и др. // Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54. – № 4. – С. 595–604 (вклад соискателя – 60 %).

12. Легких, А.Ю. Обеспечение коррозионной стойкости сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях / А.Ю. Легких, **Р.Ш. Асхадуллин**, Р.П. Садовничий // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 1. – С. 138–148. (Вклад соискателя – 45 %).

13. Асхадуллин, Р.Ш. Жидкометаллическая технология синтеза наноструктурного аэрогеля $AlOON$ и перспективы его использования в ЯЭУ / **Р.Ш. Асхадуллин**, П.Н. Мартынов, А.А. Осипов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2015. – № 4. – С. 28–39. (Вклад соискателя – 85 %).

14. Садовничий, Р.П. Контроль содержания кислорода в ТЖМТ. Проблемы и решения / Р.П. Садовничий, П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин** и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2015. – № 3. – С. 115–120. (Вклад соискателя – 25 %).

15. Мартынов, П.Н. Анализ средств «твердофазного» регулирования кислородного потенциала в ТЖМТ / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких, А.А. Симаков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2015. – № 3. – С. 79–84. (Вклад соискателя – 45 %).

16. Асхадуллин, Р.Ш. Технология обеспечения заданного кислородного режима в перспективных проектах ЯЭУ с ТЖМТ / **Р.Ш. Асхадуллин**, П.Н. Мартынов, А.Ю. Легких, А.А. Симаков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2015. – № 2. – С. 79–83. (Вклад соискателя – 55 %).

17. Мартынов, П.Н. Современные вопросы и задачи технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец, свинец-висмут) / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, Ю.И. Орлов, А.Н. Стороженко // Вопросы

атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2015. – № 2. – С. 60–69. (Вклад соискателя – 40 %).

18. Мартынов, П.Н. Анализ современного состояния технологии свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей / П.Н. Мартынов, В.И. Рачков, **Р.Ш. Асхадуллин** и др. // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – № 4. – С. 234–240. (Вклад соискателя – 40 %).

19. Асхадуллин, Р.Ш. Синтез наноструктурных материалов из металлических расплавов и перспективы их использования в различных областях науки и техники / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.А. Осипов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 35–42. (Вклад соискателя – 90 %).

20. Асхадуллин, Р.Ш. Результаты измерения гидравлического сопротивления зернистого слоя оксида свинца в потоке свинцово-висмутового теплоносителя / **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких, А.А. Симаков, Е.В. Гавриков // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2014. – № 1. – С. 48–53. (Вклад соискателя – 40 %).

21. Асхадуллин, Р.Ш. Расчетно-экспериментальные исследования в обоснование массообменных аппаратов для обеспечения заданного кислородного режима в ТЖМТ (Pb, Pb-Bi) / **Р.Ш. Асхадуллин**, П.Н. Мартынов, В.И. Рачков, А.Ю. Легких // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 160–171. (Вклад соискателя – 60 %).

22. Легких, А.Ю. Расчет массообменных аппаратов для обеспечения заданного кислородного режима в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе / А.Ю. Легких, П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин** // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 80–91. (Вклад соискателя – 33 %).

23. Мартынов, П.Н. Особенности использования железоксидных электродов сравнения в твердоэлектродных датчиках контроля термодинамической активности кислорода / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, К.Д. Иванов, М.Е. Чернов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 3. – С. 62–67. (Вклад соискателя – 25 %).

24. Мартынов, П.Н. Особенности метрологической поверки датчиков активности в жидкометаллических теплоносителях / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Н. Стороженко и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 3. – С. 68–74. (Вклад соискателя – 20 %).

25. Асхадуллин, Р.Ш. Оценка интенсивности процессов окисления конструкционных сталей первого контура ЯЭУ с тяжелыми теплоносителями / **Р.Ш. Асхадуллин**, К.Д. Иванов, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 121–128. (Вклад соискателя – 45 %).

26. Мартынов, П.Н. Экспериментальные исследования усовершенствованного массообменного аппарата с твердофазным источником кислорода применительно к технологии теплоносителя 44,5 % Рb - 55,5 % Bi / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Ю. Легких, А.А. Симаков // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 161–168. (Вклад соискателя – 40 %).

27. Мартынов, П.Н. Автоматическая система управления термодинамической активностью кислорода в свинцово-висмутовом теплоносителе / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.А. Симаков и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 3. – С. 176–183. (Вклад соискателя – 35 %).

28. Мартынов, П.Н. Твердофазная технология регулирования кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.А. Симаков и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 1. – С. 145–151. (Вклад соискателя – 45 %).

29. Симаков, А.А. Разработка и экспериментальная эксплуатация массообменных аппаратов для обеспечения заданного кислородного режима в теплоносителях на основе свинца / А.А. Симаков, П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин** и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2004. – № 4. – С. 200–206. (Вклад соискателя – 30 %).

Патенты:

1. Патент № 2596159, Российская Федерация, МПК G21C 17/022; G21C 15/247. Способ диагностики теплоносителя свинцово-висмутового быстрого реактора и диагностическая система для осуществления способа / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Н. Стороженко, А.Ю. Легких. – № 2014150469/07: заявл.15.12.2014: опубл. 27.08.2016: бюл. № 24. (Вклад соискателя – 25 %).

2. Патент № 2590895, Российская Федерация, МПК G21C 17/025, G21C 15/247. Способ и система регулирования концентрации кислорода и водорода в реакторной установке и ядерная реакторная установка / П.Н. Мартынов, К.Д. Иванов, **Р.Ш. Асхадуллин** и др. – № 2014144533/07: заявл. 07.11.2014: опубл. 10.07.2016: бюл. № 19. (Вклад соискателя – 12,5 %).

3. Патент № 2584378, Российская Федерация, МПК G01N 27/411. Способ измерения термодинамической активности кислорода в расплавах жидких металлов / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Н. Стороженко и др. – № 2014151438/28: заявл. 19.12.2014: опубл. 20.05.2016: бюл. № 14. (Вклад соискателя – 20 %).

4. Патент № 2566087, Российская Федерация, МПК G21C 15/00. Способ и устройство регулирования концентрации кислорода в реакторной установке и ядерная реакторная установка / П.Н. Мартынов, К.Д. Иванов, **Р.Ш. Асхадуллин** и др. – № 2014123858/07: заявл. 11.06.2014: опубл. 20.10.2015: бюл. № 29. (Вклад соискателя – 15 %).

5. Патент № 2545517, Российская Федерация, МПК G21C 17/025. Ядерный реактор с жидкометаллическим теплоносителем, система для контроля термодинамической активности кислорода в таких реакторах и способ контроля термодинамической активности кислорода / **Р.Ш. Асхадуллин**, К.Д. Иванов, П.Н. Мартынов, А.Н. Стороженко. – № 2013150258/07: заявл. 12.11.2013: опубл. 10.04.2015: бюл. № 10. (Вклад соискателя – 25 %).

6. Патент № 2543573 C1, Российская Федерация, МПК C23C 22/00; C23F 11/00. Способ внутриконтурной пассивации стальных поверхностей ядерного реактора на быстрых нейтронах / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.Н. Стороженко и др. – № 2013154531/02: заявл. 10.12.2013: опубл. 10.03.2015: бюл. № 7. (Вклад соискателя – 15 %).

7. Патент № 2547104, Российская Федерация, МПК B01J 8/00, B01F 1/00. Массообменный аппарат / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.А. Симаков, А.Ю. Легких. – № 2013139258/05: заявл. 26.08.2013: опубл. 20.03.2015: бюл. № 7. (Вклад соискателя – 25 %).

8. Патент № 2542329, Российская Федерация, МПК G21C 1/03. Способ внутриконтурной пассивации стальных поверхностей ядерного реактора / П.Н.

Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, К.Д. Иванов и др. – № 2013143712/07: заявл. 30.09.2013: опубл. 20.02.2015: бюл. № 5. (Вклад соискателя – 15 %).

9. Патент № 2510291, Российская Федерация, МПК В01J 8/00, В01F 1/00. Массообменный аппарат с дискретной подачей газовой среды / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.А. Симаков и др. – № 2011153922/05: заявл. 29.12.2011: опубл. 10.07.2013: бюл. № 19. (Вклад соискателя – 20 %).

10. Патент № 2481140, Российская Федерация, МПК В01D 3/00. Массообменный аппарат с непрерывной подачей газовой среды / П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.А. Симаков и др. – № 2011153921/02: заявл. 29.12.2011: опубл. 10.05.2013: бюл. № 13. (Вклад соискателя – 20 %).

11. Патент РФ № 2246561, Российская Федерация, МПК С23F 11/00. Способ поддержания коррозионной стойкости стального циркуляционного контура со свинецсодержащим теплоносителем и массообменное устройство для его реализации (варианты) / Ю.М. Сысоев, П.Н. Мартынов, **Р.Ш. Асхадуллин**, А.А. Симаков. – № 2003126886/02: заявл. 03.09.2003: опубл. 20.02.2005: бюл. № 5. (Вклад соискателя – 25 %).

Тираж 80 экз. Заказ №273. Подписано в печать 16.10.2025.
Отпечатано с оригинала автора в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».
г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.