



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
работе НГТУ

А.А. Куркин

2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ –

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) на диссертационную работу Асхадуллина Радомира Шамильевича «Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец-висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл и радиационная безопасность»

Диссертационная работа Асхадуллина Р.Ш. 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 режимы работы массообменных аппаратов (МА) 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 (РУ) 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 работы

Стратегией развития атомной энергетики России до 2050 г. предусмотрено создание реакторов на быстрых нейтронах с тяжелыми

жидкометаллическими теплоносителями свинец и свинец-висмут. Аналогичные разработки ведутся в Китайской Народной Республике, странах Европейского Союза, Соединенных Штатах Америки, Японии и Южной Корее.

Вопросы обеспечения технологии ТЖМТ являются чрезвычайно актуальными при проектировании и эксплуатации нового поколения РУ малой и средней мощности (БРЕСТ-ОД-300, БР-1200, СВБР-100, МАСММ и др.), а также исследовательских стендов. Это связано с обеспечением чистоты теплоносителей первых контуров таких реакторов и стендов для реализации проектных теплогидравлических характеристик, а также с обеспечением противокоррозионной защиты оборудования и конструкционных сталей контуров для достижения повышенного ресурса их работы в ТЖМТ. Основным процессом технологии свинцового (свинцово-висмутового) теплоносителя является регулируемая подпитка ТЖМТ растворенным кислородом для поддержания заданного эксплуатационного диапазона содержания кислорода в теплоносителе $((1-4) \cdot 10^{-6} \% \text{ мас.})$ с целью обеспечения формирования и поддержания целостности оксидных защитных (противокоррозионных) покрытий на сталях и предотвращения шлаковых образований в контуре, ухудшающих теплогидравлику в нем.

Ранее разработанные методы подпитки растворенным кислородом ТЖМТ (ввод газовых смесей, содержащих а) воздух и инертный газ (аргон или гелий) или б) водяной пар, водород и инертный газ; метод «холодной точки» (расходование оксидных шлаков, находящихся в низкотемпературной части неизотермического контура)), нашедшие в 60-90-х годах прошлого века применение для небольших по объему ТЖМТ петлевых РУ атомных подводных лодок и исследовательских стендов не могут быть применены для создаваемых реакторных установок интегральной компоновки с большими объемами свинцового (свинцово-висмутового) теплоносителя по причинам малой производительности, трудности доставки газовой фазы в различные участки контура, ожелезнения и блокировки растворения образующегося в объеме или на поверхности ТЖМТ твердофазного оксида свинца при вводе газовых смесей в теплоноситель, эрозионного воздействия газовых смесей на стали и оборудование в контуре и др.

В этой связи выполненная Асхадуллиным Р.Ш. разработка устройств регулируемой подпитки свинца (свинца-висмута) растворенным кислородом (массообменных аппаратов), основанных на управляемом растворении в ТЖМТ гранул твердофазного оксида свинца, размещаемых под уровнем ТЖМТ и защищенных от ожелезнения, является актуальной.

Выбранная диссертантом тема представляет интерес не только для специалистов и организаций в данной области знаний, но и для специалистов и организаций, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией ускорительно управляемых систем (электроядерных установок), разрабатываемых во многих странах.

Научная новизна работы

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 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. По результатам исследований 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 и стационарных установках.

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

6) Впервые сформулирована концепция и структура автоматизированной системы регулирования термодинамической активности (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.

Достоверность и апробация результатов

Достоверность выполненных исследований и полученных в работе результатов подтверждается:

- воспроизводимостью результатов выполненных исследований и объемом данных, полученных в ходе лабораторных и стендовых исследований;
- применением аттестованных измерительных приборов и методик, согласованностью полученных результатов с существующими литературными данными.

Основные положения и результаты работы были представлены автором и обсуждены 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).

Практическая значимость работы

Научно-технические результаты диссертанта 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 разработке и изготовлении для исследовательских установок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» 33 массообменных аппаратов (МА);
- при разработке и изготовлении для исследовательских установок АО «НИКИЭТ» 10 МА;
- при разработке и изготовлении для исследовательских установок ЦНИИ КМ «Прометей» 7 МА;
- при разработке и изготовлении для исследовательских установок АО «ЦКБМ» 4 МА;
- при разработке и изготовлении для исследовательского стенда «ФТ-4» НГТУ 1 МА;
- при разработке и изготовлении для исследовательской установки АО «ИРМ» 1 МА;
- при разработке и изготовлении для исследовательского стенда «CIRCE» (ENEA, Бразимоне, Италия) 1 МА;
- при разработке и изготовлении для исследовательского стенда «ЭТГС» ФГУП «НИТИ» 1 МА;
- при изготовлении гранулированного оксида свинца в количестве ~ 720 кг.

Разработанные в диссертации конструкции 58 МА, 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), обеспечили и позволят в дальнейшем обеспечить противокоррозионную защиту (ресурс) конструкционных сталей перечисленных исследовательских стендов с ТЖМТ. На основании этих разработок, а также выполненных в диссертации разработок МА для реакторных установок с теплоносителями Рb и Рb-Bi диссертантом 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 МА, 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.

Следует отметить, 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, например, в электроядерных установках.

В диссертации в качестве Приложения представлен Акт использования результатов диссертации.

Личный вклад автора

Асхадуллин Р.Ш. принимал ведущее участие на всех этапах работ, ставших основой представленной диссертации. Подробно личный вклад описан в автореферате и тексте диссертации, но особо стоит выделить:

- разработаны 60 конструкций массообменных аппаратов для исследовательского и промышленного использования, а также методики определения их производительности;
- разработаны технологии изготовления гранул РbО для заполнения массообменных аппаратов;
- проведены экспериментальные исследования на циркуляционных стендах и статических установках с ТЖМТ;
- проведена обработка опытных данных с получением расчетных зависимостей и построением физических моделей;
- подготовлены материалы по массообменным аппаратам для исследовательских стендов и реакторных установок с интегральной компоновкой первого контура со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями.

Оценка содержания диссертации и ее завершенности

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 197 наименований, приложения. Работа содержит 357 страниц, 171 рисунок и 55 таблиц.

Во **введении** раскрыта актуальность темы, определены цель и задачи работы, сформулированы основные положения, обладающие научной новизной и практической значимостью и выносимые на защиту, изложен личный вклад автора.

В **главе 1** приведен литературный обзор литературных источников и содержится анализ форм существования кислорода в ТЖМТ, распределений примесей кислорода и железа по различным температурным зонам неизотермических контуров со свинцом (свинцом-висмутом), анализ рекомендованных диапазонов содержания примеси растворенного кислорода в неизотермических контурах РУ и исследовательских стендов с теплоносителями Pb и Pb–Bi для пассивационного и эксплуатационного режимов работы, анализ достоинств и недостатков существующих методов и средств контроля кислорода в свинце и свинце-висмуте, а также ранее разработанных методов и средств подпитки ТЖМТ кислородом.

В **главе 2** рассмотрены результаты выполненных автором исследований в обоснование применения твердофазного метода регулирования содержания (термодинамической активности) примеси растворенного кислорода в свинцовом (свинцово-висмутовом) теплоносителе. В главе представлены методики экспериментальных исследований, результаты термодинамического анализа стойкости конструкционных керамических материалов (чувствительного элемента датчика активности кислорода в свинце (свинце-висмуте), керамического клея (ситалла) для соединения элементов датчика активности кислорода (ДАК), материала тиглей), выбранных для использования в экспериментах и контактировавших с ТЖМТ. В этой главе также представлены: результаты определения температурной зависимости растворимости кислорода в расплаве свинца (свинца-висмута), удельной скорости растворения гранул PbO в расплаве свинца в зависимости от скорости свинца и температуры, числа слоев (высоты засыпки) гранул PbO; критериальная зависимость, описывающая кинетику растворения гранул PbO

свинца. В главе также приведены результаты экспериментально-расчетного определения гидравлического сопротивления слоя засыпки гранул PbO при прохождении потока ТЖМТ. Полученные результаты необходимы для расчетов производительности и ресурса массообменных аппаратов различных конструкций, разрабатываемых для обеспечения заданных кислородных режимов как в исследовательских стендах, так и в реакторных установках с теплоносителями Pb и $Pb-Bi$.

В главе 3 представлены результаты разработок и обоснований конструкций МА для исследовательских стендов и установок с теплоносителями Pb и $Pb-Bi$ (конструкции МА со встроенными и внешними нагревателями, с осевыми и газлифтными насосами, с дискретной подачей газовой среды и капельного типа для циркуляционных стендов и статических установок с ТЖМТ). Разработана методика расчетно-экспериментального определения производительности массообменных аппаратов с различными побудителями расхода ТЖМТ через МА. Сформулирована концепция автоматизированного регулирования ТДА кислорода в свинцовом (свинцово-висмутовом) теплоносителе с использованием массообменного аппарата и датчика активности кислорода, разработана структура системы автоматизированного регулирования (САР) ТДА. Для САР ТДА кислорода автором обоснованы применение автоматического регулятора с обратной связью (ПИД-регулятора), а также возможность (с помощью САР ТДА кислорода) индикации состояния поверхностей конструкционных сталей и оборудования первого контура РУ или исследовательского стенда с ТЖМТ без прекращения циркуляции теплоносителя, основанной на контроле скорости потребления кислорода контуром.

В главе 4 выполнены разработка и обоснование конструкции массообменного аппарата для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцово-висмутовом теплоносителе в реакторной установке с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя $Pb-Bi$ до 30 м^3 . Рассмотрены достоинства и недостатки конструкций МА со встроенным насосом, с дискретной подачей газовой среды, капельного (перемещаемого) типа. Обоснована конструкция МА со встроенным нагревателем. Производительность каждого из 4 массообменных аппаратов

такой конструкции по растворенному кислороду, подаваемому в свинец-висмут, составила $(1,3 \pm 0,4)$ г [О]/ ч при мощности нагревателя 4 кВт. Диссертантом даны рекомендации по разработке массообменного аппарата для РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем.

В главе 5 диссертации выполнены разработка и обоснование конструкции массообменного аппарата для регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцовом теплоносителе реакторной установки с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя до 1000 м³. Рассмотрены конструкции МА с внутренними нагревателями погружного типа, регулятором типа «Игла», дискретной подачей газовой среды, встроенным насосом и регулировочным клапаном. Проанализированы условия пригодности этих конструкций. Обоснована конструкция МА со встроенным насосом. Производительность каждого из четырех массообменных аппаратов такой конструкции по растворенному кислороду, подаваемому в свинцовый теплоноситель, составила (45 ± 10) г [О]/ ч при расходе Рв 5,5 м³/ч, температуре 420 °С и высоте слоя засыпки гранул РвО не менее 1 м. Определены массогабаритные характеристики массообменного аппарата, его ожидаемый ресурс работы в составе РУ (250 000 ч) и периодичность замены засыпки гранул РвО в МА.

Диссертантом даны рекомендации по разработке МА со встроенным насосом для РУ со свинцовым теплоносителем.

В заключении представлены основные выводы по результатам диссертации.

Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме. Стил ь изложения четкий и ясный. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК.

Автореферат в полной мере отражает наиболее существенные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Изложенные в диссертационной работе методы, подходы, результаты и выводы имеют существенное значение для создания и эксплуатации устройств (массообменных аппаратов) регулируемой подпитки растворенным кислородом

реакторных установок и исследовательских стендов с ТЖМТ с целью обеспечения противокоррозионной защиты конструкционных сталей и оборудования, а также поддержания качества ТЖМТ для обеспечения заданных теплогидравлических характеристик первых контуров РУ и жидкометаллических контуров стендов.

Соответствие содержания диссертации специальности

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»: в части разработки оборудования объектов ядерной техники, моделирования химических процессов, обеспечивающих достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование при эксплуатации, разработки экспериментальных методик и экспериментальных исследований вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций и оборудования с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники, разработки методов проведения исследований, проектирования, а также научно-обоснованных технических решений технологии материалов атомной промышленности.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В тексте работы и автореферате отсутствуют сведения о возможности и подходах к созданию «цифрового двойника» для универсальной разработки массообменного аппарата для различных РУ и исследовательских стендов с ТЖМТ.
2. Как гарантируется заявляемая производительность массообменных аппаратов?
3. В какой подтвержденной химической форме находится кислород, вводимый массообменными аппаратами в ТЖМТ?
4. В автореферате (рис. 9, с. 34) на правой оси ординат не указано обозначение контролируемого параметра.

Указанные замечания не снижают высокого научно-технического уровня, научной новизны и практической значимости диссертационной работы.

Представленных в диссертации и автореферате данных достаточно для понимания личного вклада соискателя в получение результатов работы.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Асхадуллина Радомира Шамильевича «Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец–висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, которая полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями и дополнениями от 16.10.2024 (вступ. в силу 01.01.2025). Работа обладает актуальностью, результаты работы обладают научной новизной и практической значимостью, результаты и выводы обоснованы и достоверны. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы. Результаты диссертации соответствуют паспорту специальности 2.4.9.

Соискатель Асхадуллин Радомир Шамильевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Отзыв на диссертационную работу Асхадуллина Р.Ш. подготовлен на основании заключения, сделанного по итогам обсуждения диссертации и автореферата на расширенном заседании кафедры «Атомные и тепловые станции» Института ядерной энергетики и технической физики (ИЯЭиТФ) Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, протокол заседания кафедры № 4 от 18 декабря 2025 г.

Отзыв составили:

Ректор, д.т.н., профессор

 С.М. Дмитриев

Директор ИЯЭиТФ, к.т.н.

 М.А. Легчанов

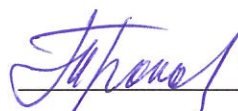
Зав. кафедрой «ЯРиЭУ», д.т.н., профессор

 В.В. Андреев

Профессор, д.т.н.

 В.И. Мельников

Доцент, к.т.н.

 Т.А. Бокова

Подписи С.М. Дмитриева, М.А. Легчанова, В.В. Андреева, В.И. Мельникова, Т.А. Боковой заверяю:

Ученый секретарь НГТУ

 И.Н. Мерзляков

Сведения о ведущей организации

Почтовый адрес: Россия, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ).

Телефон: +7(831)436-63-07.

Адрес электронной почты: nntu@nntu.ru.

Официальный сайт: www.nntu.ru.