

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А.И. Лейпунского»
(АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнинск

16.06.2025 № 224/2.2.-1 2025 УТВЕРЖДАЮ

Секции Научно-технического совета
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Генеральный директор

А.А. Лебезов

2025 г.



Диссертационная работа **«Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец-висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок»** на соискание ученой степени доктора технических наук выполнена в Отделении ядерной энергетики Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»).

В период подготовки диссертации соискатель Асхадуллин Радомир Шамильевич работал в Акционерном обществе «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», в Отделении ядерной энергетики начальником Департамента физико-химических технологий.

Асхадуллин Р.Ш. в 1993 г. окончил с отличием Обнинский институт атомной энергетики по специальности «Инженер-физик-теплоэнергетик», диплом Г-І № 470890.

Асхадуллин Р.Ш. 14.11.1997 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Сорбционная очистка жидкометаллических теплоносителей ядерных установок (галлий, свинец, свинец-висмут)» по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации» в диссертационном совете ГНЦ РФ – ФЭИ» (шифр диссертационного совета Д 201.003.01). Диплом кандидата технических наук: серия КТ, № 042122 от 13.02.1998 г.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Тема диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук утверждена на заседании секции НТС Института инновационных технологий ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ» от 28 июня 2013 г. (Протокол № 19).

Диссертационная работа изложена на 357 страницах машинописного текста, включает содержание, введение, пять глав, заключение, список сокращений, список литературы, приложение.

В диссертации Асхадуллина Р.Ш. изложены **новые научно-обоснованные технические решения** по разработке, созданию и внедрению в практику эксплуатации исследовательских стендов и перспективных реакторных установок (РУ) малой и средней мощности со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями массообменных аппаратов (МА) для противокоррозионной защиты конструкционных сталей.

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность работы связана с реализацией проектов по разработке и сооружению реакторов малой и средней мощности нового поколения со свинцовым (БРЕСТ-ОД-300, БР-1200) и свинцово-висмутовым (СВБР-100, МАСММ) теплоносителями, сооружением и эксплуатацией многочисленных отечественных и зарубежных стендов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) на основе свинца и обусловлена тем, что существует необходимость решения проблемы разработки нового метода и средства выполнения задач технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (обеспечение противокоррозионной защиты конструкционных сталей таких реакторов, стендов; обеспечение отсутствия их зашлаковки оксидами теплоносителя; обеспечение очистки теплоносителя от окисляемых компонентов сталей).

В диссертационной работе обобщены основные результаты исследований в обоснование регулирования содержания примеси растворенного кислорода в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителях исследовательских стендов и перспективных реакторных установок малой и средней мощности нового поколения методом и средствами управляемого растворения твердофазного оксида свинца (массообменными аппаратами).

Внедрение полученных результатов позволяет обеспечить соответствие многочисленных исследовательских стендов и перспективных реакторов малой и средней мощности с ТЖМТ современному уровню безопасности и эксплуатационной надёжности, что свидетельствует об актуальности и своевременности представленной работы.

2. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации

Соискатель 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 экспериментальных 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.

Все перечисленные работы проводились под руководством Асхадуллина Р.Ш. и при его личном участии.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов диссертационной работы не вызывает сомнений и базируется на всестороннем анализе ранее выполненных работ по предмету исследований, обеспечивается воспроизводимостью результатов экспериментов, использованием на экспериментальных стендах современных методик исследований и метрологически аттестованных приборов.

4. Научная новизна и практическая значимость результатов проведенных исследований

Научная значимость диссертационной работы заключается в следующем:

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. Экспериментально исследован эффект «отравления» оксидов свинца железом. Показано, что данный эффект связан с химическим взаимодействием примеси железа с поверхностным слоем оксида свинца. Предложен и реализован в конструкциях созданных МА способ предотвращения «отравления» гранул 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 (Pb, Pb-Bi).

4. Впервые выполнены испытания и опытная эксплуатация массообменных аппаратов на циркуляционных стендах (10 типов МА) и стационарных установках (2 типа МА). Общая наработка созданных 58 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 термодинамической активности 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 МА для модульных РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура с объемом теплоносителя до 30 м^3 и проведены экспериментальные исследования на макетном образце МА.

8. Впервые разработана конструкция МА для РУ со свинцовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура с объемом теплоносителя до 1000 м^3 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 МА по кислороду.

Практическая значимость работы

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

Всего в ходе работы было создано 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, ENEA (Италия), НИТИ 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 для обоснования конструкций массообменных аппаратов применительно к перспективным реакторным установкам малой и средней мощности с ТЖМТ.

Материалы диссертации использованы не только для обеспечения исследований на многочисленных экспериментальных стендах и установках, но и в технических проектах массообменных аппаратов для создаваемых РУ с ТЖМТ малой и средней мощности (БРЕСТ-ОД-300, СВБР-100), технологических регламентах работы поставляемых ГНЦ РФ – ФЭИ массообменных аппаратов для отечественных и зарубежных исследовательских циркуляционных стендов с ТЖМТ.

Разработанные конструкции массообменных аппаратов являются средствами обеспечения заданных кислородных режимов для противокоррозионной защиты

сталей как исследовательских стендах с ТЖМТ, так и в перспективных реакторных установках со свинцом и свинцом-висмутом.

Результаты и разработки соискателя могут быть использованы не только при создании и эксплуатации ядерных реакторов малой и средней мощности с ТЖМТ, но также и в других областях науки и техники. Возможной областью их применения могут быть ускорительно управляемые системы (электроядерные установки), разрабатываемые во многих странах, а также в Российской Федерации, где в настоящее время проработаны варианты конструктивных схем нейтроногенерирующих мишеней, создана и испытана мишень, в которой пучок нейтронов воздействует через стальную мембрану на циркулирующий в замкнутом контуре расплав свинца с висмутом.

Оформлен Акт внедрения результатов диссертационной работы.

5. Ценность научных работ соискателя заключается в разработке методологии создания массообменных аппаратов для обеспечения задач технологии теплоносителя в любых исследовательских стендах или первых контурах реакторных установок малой и средней мощности с ТЖМТ.

6. Научная специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа Асхадуллина Р.Ш. «Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец-висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок» соответствует паспорту научной специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»:

- формуле паспорта специальности, так как в диссертации рассматриваются вопросы «Разработка оборудования объектов ядерной техники», «Моделирование химических процессов, обеспечивающее достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование при эксплуатации», «Разработка экспериментальных методик и экспериментальные исследования вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций и оборудования с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники», «Разработка методов проведения исследований, проектирования, а также научно-обоснованных технических решений технологии материалов атомной промышленности»;
- областям исследования паспорта специальности, в частности:
 - 1) пункту «Разработка экспериментальных методик и экспериментальные исследования в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники»;
 - 2) пункту «Разработка методов проведения исследований, проектирования, а также научно-обоснованных технических решений в области атомного

реакторостроения, машин, агрегатов, технологии материалов атомной промышленности»;

- 3) пункту «Моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование при эксплуатации, а также снятие с эксплуатации»;
- 4) пункту «Разработка оборудования и роботизированных комплексов производства и эксплуатации оборудования и технологических систем объектов ядерной техники».

7. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации достаточно полно 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).

Диссертационная работа **«Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец-висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок»** Асхадуллина Р.Ш. соответствует специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» и является законченной **научно-квалификационной работой**, в которой решена **важная научно-техническая проблема** 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.

Данная диссертационная работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Актуальность и новизна темы, а также научный уровень и значимость полученных результатов позволяют рекомендовать диссертационную работу **«Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец-висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок»** Асхадуллина Р.Ш. к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» в диссертационном совете 75.1.077.01 АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».

Диссертация заслушана и Заключение по ней принято на открытом заседании секции «Теплофизика и технология теплоносителей» НТС АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». Присутствовало на заседании 18 человек из 22 человек – членов НТС. Результаты голосования: «за» 18 человек, «против» – 0 человек, воздержалось – 0 человек, протокол № 224/5-06/08 от 16.06.2025 г.

Председатель секции НТС,
главный научный сотрудник
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
доктор технических наук, с.н.с.

Сорокин А.П.

Ученый секретарь секции НТС,
главный научный сотрудник
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
доктор технических наук

Верещагина Т.Н.

СОГЛАСОВАНО:

Председатель НТС АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
научный руководитель АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
доктор технических наук, с.н.с.

Троянов В.М.

16.06.2025