

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, профессора Рисованого Владимира Дмитриевича 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, радиационная безопасность

В Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. большое внимание уделено ядерным реакторам на быстрых нейтронах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями, в которых исключены аварии, выходящие за пределы здания, в котором размещается реакторная установка, и не требуется эвакуации персонала и гражданского населения. В России имеется положительный опыт использования ядерных реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем на подводных лодках, проведены проектные работы для реактора СВБР-100 со свинцово-висмутовым теплоносителем и БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, ведется строительство реактора БРЕСТ-ОД-300, ввод в эксплуатацию которого планируется в 2028 г. Разработка ядерных реакторов с этими тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) проводится во многих странах, включая Китай, США, Бельгию, Японию. Расплавы свинца и его сплава с висмутом оказывают коррозионно-активное воздействие на конструкционные материалы ядерных энергетических установок и других аппаратов и могут применяться только при наличии защитных покрытий на поверхностях изделий, контактирующих с ТЖМТ. Одним из эффективных направлений является формирование оксидных покрытий непосредственно в процессе эксплуатации оборудования и элементов активных зон ядерных реакторов. Для обоснования их работоспособности создаются специальные стенды и устройства, на которых проводятся исследования коррозионно-эрозионных процессов в конструкционных материалах, а также массообменных аппаратов для поддержания на необходимом уровне растворенного кислорода в теплоносителе. Поэтому, **актуальность** диссертационной работы Асхадуллина Радомира Шамильевича, посвященной разработке оборудования, массообменных аппаратов (МА) с управляемой подпиткой растворенным кислородом свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей для формирования защитных оксидных покрытий на сталях с различными объемами ТЖМТ (до 10 л, до 7000 л, до 30 м³, до 1000

м³) и различными поверхностями сталей (ЭП-823, ЭП-302, 12Х18Н10Т) в температурном диапазоне (420-540) °С, изучению коррозионно-эрозионных процессов сталей в этих теплоносителях, экспериментально-расчетному обоснованию работоспособности элементов активных зон БР-реакторов, не вызывает сомнения.

Научной новизной диссертационной работы является получение экспериментальных данных о поведении сталей ЭП-823 и ЭП-302 в различных потоках свинца и свинца-висмута при температурах (420-540) °С с различным содержанием кислорода от 10⁻³ % масс. до 10⁻⁷ % масс., разработка твердофазного метода регулирования содержания кислорода в ТЖМТ с использованием массообменных аппаратов с гранулами оксида свинца PbO, изучение массоотдачи (производительности) твердофазного оксида свинца из разных МА для разных объектов с ТЖМТ. Получены температурные зависимости в виде логарифма концентрации насыщения кислорода в свинце: $\lg C_{[O]} = 3,438 - 5240/T$ и в свинце- висмуте $\lg C_{[O]} = 1,18 - 3400/T$. Новизна проведенных исследований подтверждается также получением 11-ти Патентов РФ.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке и изготовлении 58 различных типов массообменных аппаратов для 8-ми организаций, включая иностранную организацию ENEA (Италия), разработке технологии и изготовлении более 700 кг различного вида гранул PbO для этих аппаратов, разработке и внедрении методик поддержания на требуемом уровне содержания кислорода в теплоносителе. Результаты, полученные в диссертации Асхадуллина Р.Ш., использовались при разработке технических проектов массообменных аппаратов для реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем «БРЕСТ-ОД-300», «СВБР-100».

Автором диссертации сформулирована **цель исследований** – «разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в ТЖМТ, их изготовление, испытание, адаптация к технологическим процессам, поставка 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».

На защиту вынесены следующие положения:

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 м³).
5. Результаты разработки конструкции массообменного аппарата для реакторной установки со свинцовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура (с объемом теплоносителя до 1000 м³).

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 197 наименований, представлена на 357 листах, содержит 171 рисунок и 55 таблиц.

В первой главе диссертационной работы рассмотрены физико-химические процессы при содержании кислорода в теплоносителях Pb и Pb-Bi, анализ методов контроля кислорода в ТЖМТ, результатов исследований температурного распределения примесей кислорода и железа в расплавах свинца и свинца-висмута. Рассмотрены достоинства и недостатки известных методов регулирования содержания растворенного кислорода. До 2000 г., как у нас в стране, так и за рубежом, для введения кислорода в ТЖМТ использовали газовые смеси «инертный газ – кислород», «инертный газ – кислород – водяной пар». Это приводило к *появлению твердофазных оксидов PbO и шлакообразованию.*

Во второй главе диссертации представлены полученные автором диссертации результаты физико-химических исследований в обоснование применения твердофазного метода регулирования содержания растворенного кислорода в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителе, описаны методики экспериментальных исследований. Особо необходимо отметить результаты растворимости гранул PbO в расплаве свинца и свинца-висмута в зависимости от скорости, температуры и числа слоев гранул. Важным результатом является также определение гидравлического сопротивления слоя засыпки гранул PbO при прохождении потока ТЖМТ. Полученные результаты

необходимы для расчетов производительности и ресурса массообменных аппаратов различных конструкций, разработанных для обеспечения заданных кислородных режимов как в исследовательских стендах, так и в реакторных установках с теплоносителями Pb и Pb-Bi.

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты разработки и обоснования конструкций массообменных аппаратов для исследовательских стендов и установок с теплоносителями Pb и Pb-Bi. В ходе выполненных работ созданы 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. Представлены результаты по технологии получения прессованных гранул PbO. Особо необходимо отметить надежность работы изготовленного оборудования. Суммарное время работы всех массообменных аппаратов составило более 75 000 ч.

В четвертой главе диссертационной работы представлена разработка конструкции массообменного аппарата для регулирования содержания кислорода в свинцово-висмутовом теплоносителе в реакторной установке с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя Pb-Bi до 30 м³. Обоснована конструкция массообменного аппарата со встроенным нагревателем. Существенным достижением является обеспечение производительности $(1,3 \pm 0,4)$ г[O]/ч при мощности нагревателя 4 кВт.

В пятой главе диссертации выполнены разработка и обоснование конструкции массообменного аппарата для регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе реакторной установки с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя до 1000 м³. Обоснована конструкция массообменного аппарата со встроенным насосом и производительностью (45 ± 10) г[O]/ч при расходе Pb 5,5 м³/ч, температуре 420 °С и высоте слоя засыпки гранул PbO не менее 1 м. Сделаны рекомендации по разработке массообменного аппарата со встроенным насосом для реакторной установки со свинцовым теплоносителем.

При проведении исследований использованы современные методы, включая атомно-эмиссионную спектроскопию и рентгеновский анализ. Применены аттестованные методики.

Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью и применением аттестованных приборов и исследовательского оборудования.

Диссертация написана доказательно, понятным научно-техническим языком и аккуратно оформлена. Все разделы (главы) логичны и последовательны, имеют четкую структуру, что облегчает восприятие материала. Работа характеризуется высоким уровнем теоретического и практического значения.

По теме диссертационной работы опубликовано 113 работ, включая 29 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 8 статей в других научных журналах и сборниках, получено 11 Патентов РФ.

Положения и результаты, изложенные в автореферате, в целом соответствуют тексту диссертационной работы.

В процессе ознакомления с работой у оппонента возникли следующие вопросы и замечания:

1. Как зависит скорость растворения кислорода в ТЖМТ от формы и размера гранул PbO ?
2. Как влияет масштабный фактор размеров стендов и массообменных аппаратов на растворение кислорода и поддержание его содержания на требуемом уровне в реальных реакторных установках?
3. Коррозионно-эрозионные характеристики зависят от температуры и скорости протекания ТЖМТ. В различных частях активной зоны реактора они разные. Как это предлагается учитывать при введении кислорода твердофазным методом?
4. В ТЖМТ в процессе облучения может накапливаться водород, например, тритий при протекании ядерных реакций на боре в негерметичных конструкциях стержней регулирования. Как водород (тритий) повлияет на коррозионную и эрозионную стойкость конструкционных материалов и может ли изменить поддерживаемый интервал растворенного кислорода $(1-4)10^{-6} \%$ масс.
5. Как реакторное облучение повлияет на результаты стендовых испытаний?
6. Отсутствуют литературные ссылки на формулы, например, 1.2 (стр.23), а также рисунки с диаграммами, например, рис.1.11 (стр.50).

Подводя итог анализу представленной диссертации, считаю необходимым отметить, что указанные замечания не снижают достоинств работы и ее общей положительной оценки. Часть этих замечаний носит дискуссионный характер. В целом, диссертация представляет собой значительный научный труд в виде законченного исследования, выполненного на высоком научно-техническом уровне.

Резюмируя вышесказанное и основываясь на совокупности достоинств представленной работы, полагаю, что диссертационная работа «Разработка

устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец-висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок» соответствует пп. 9-11, 13, 14 «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), а ее автор Асхадуллин Радомир Шамильевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.9 - Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Официальный оппонент

Научный руководитель

АО «НИИ НПО «ЛУЧ»,

профессор, доктор технических наук

В.Д. Рисованый

« 05 » 11 2025 г.

Почтовый адрес: 142103, Г.о. Подольск,

Ул. Железнодорожная, д.24, Телефон:

+7 (495)502-79-52, доб.2480

E-mail: VDMrisovanyy@rosatom.ru

Подпись Рисованого В.Д. заверяю

Начальник отдела кадров

АО «НИИ НПО «ЛУЧ»



М.В. Мельникова