

## ОТЗЫВ

официального оппонента,

члена-корреспондента Российской академии наук, профессора, доктора химических наук Зайкова Юрия Павловича на диссертационную работу Асхадуллина Радомира Шамильевича «Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкокометаллических 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.

Создание ядерных реакторов на быстрых нейтронах с тяжёлыми жидкокометаллическими теплоносителями (свинец, эвтектический сплав 44,5 % Pb – 55,5 % Bi) занимает значительное место в Стратегии развития отечественной ядерной энергетики до 2050 г. Такие реакторы должны обеспечить: исключение аварий, требующих эвакуации населения; полное использование уранового сырья; решение проблемы обращения с долгоживущими высокоактивными отходами и накопления отработанного ядерного топлива; достижение требований конкурентоспособности в сравнении с другими видами электrogенерации и др. В России накоплен положительный опыт эксплуатации ядерных реакторов со свинцом-висмутом для атомных подводных лодок. Выполнено проектирование реакторных установок (РУ) «СВБР-100» (теплоноситель 1 контура – свинец-висмут), «БРЕСТ-ОД-300» (теплоноситель 1 контура – свинец). Осуществляется строительство РУ «БРЕСТ-ОД-300» с ожидаемым сроком ввода в эксплуатацию – 2028 г. Начата проработка технического проекта реакторной установки «БР-1200» (теплоноситель 1 контура – свинец). Указанные РУ относятся к IV поколению реакторов, при создании которых должны применяться технические решения, которые исключают или предотвращают тяжёлые аварийные ситуации. Разработка реакторных установок с тяжёлыми жидкокометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) активно ведётся в настоящее время также и за рубежом (Китай, США, Южная Корея и др.).

Расплавы свинца и эвтектики свинец-висмут оказывают коррозионно-активное воздействие на конструкционные материалы ядерных энергетических установок и других аппаратов и могут применяться в циркуляционных неизотермических контурах из сталей, контактирующих с ТЖМТ, только при наличии на их поверхностях защитных оксидных покрытий. Покрытия же эти формируются и присутствуют на сталях только при строго заданных диапазонах значений концентраций кислорода, растворенного в расплавах. При

меньших или больших концентрациях защитные покрытия разрушаются соответственно вследствие диссоциации («жидкометаллическая коррозия») или чрезмерного увеличения их толщины и рыхлости («кислородная коррозия»). Особенno остро стоит проблема формирования и поддержания целостности сформированных защитных противокоррозионных покрытий в процессе ввода в эксплуатацию новых исследовательских неизотермических стендов и реакторных установок с большими поверхностями контакта конструкционных сталей и оборудования с ТЖМТ.

В этой связи **актуальность** диссертационной работы Асхадуллина Р.Ш., посвященной разработке устройств (массообменных аппаратов) управляемой подпитки растворенным кислородом свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей для формирования и поддержания целостности защитных оксидных покрытий на сталях исследовательских стендов и перспективных реакторных установок малой и средней мощности с различными объемами ТЖМТ (до 1000 м<sup>3</sup>) и различными поверхностями сталей (ЭП-823, ЭП-302, 12Х18Н10Т) в температурном диапазоне (420-540) °С, не вызывает сомнений.

К **научной новизне** диссертационной работы следует отнести: полученные экспериментальные данные и критериальную зависимость, характеризующие массоотдачу гранул твердофазного PbO – источника растворённого кислорода для ТЖМТ; полученные экспериментальные данные и зависимость гидравлического сопротивления слоя засыпки гранул PbO потоку ТЖМТ, проходящему сквозь МА; полученные температурные зависимости растворимости кислорода в свинце и свинце-висмуте; разработанные конструкции массообменных аппаратов разного принципа действия для различных исследовательских стендов и перспективных РУ с ТЖМТ (защищены патентами); методику расчетно-экспериментального определения производительности массообменных аппаратов с различными побудителями расхода теплоносителя через засыпку из гранул PbO; концепцию и структуру автоматизированной системы регулирования содержания (термодинамической активности) кислорода в ТЖМТ.

**Практическая значимость** диссертационной работы состоит в разработке, изготовлении, испытаниях и поставке для эксплуатации 58 различных типов массообменных аппаратов для 8 организаций (НИКИЭТ, ФЭИ, ЦНИИ КМ «Прометей», НГТУ, ЦКБМ, НИТИ, ИРМ, ENEA (Италия)), разработке технологии и изготовлении более 700 кг гранул PbO для этих аппаратов, разработке и внедрении методик поддержания кислородного режима в ТЖМТ на заданном уровне. Результаты, полученные в данной диссертации, использовались при разработке технических проектов массообменных аппаратов для РУ «БРЕСТ-ОД-300», «СВБР-100».

Асхадулиным Р.Ш. 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 жидкотемпературного теплоносителя (свинец, свинец-висмут) на многочисленные исследовательские стенды для обеспечения технологии тяжелого теплоносителя (ТТТ) и проведения длительных ресурсных испытаний конструкционных сталей и изделий (компонентов) жидкотемпературных 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».

Считаю, что такая цель исследований объективно оправдана, амбициозна, соответствует уровню исследований докторской диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук.

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

**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 изменении содержания растворённого кислорода в ТЖМТ, анализ методов контроля кислорода в теплоносителях Pb и 44,5% Pb – 55,5 % Bi, влияние примеси железа (компонента сталей) на распределение кислородного потенциала ТЖМТ. Рассмотрены достоинства и недостатки ранее разработанных методов регулирования содержания растворенного кислорода в свинце и свинце-висмуте. Автор диссертации вполне обоснованно аргументирует неприемлемость использования методов газофазного регулирования и «метода холодной точки» для неизотермических стендов и перспективных РУ с ТЖМТ, характеризующихся большими поверхностями контакта теплоносителя с конструкционными стальюми.

**Вторая глава** диссертационной работы содержит результаты исследований в обоснование применения твердофазного метода регулирования содержания (термодинамической активности) растворенного кислорода в ТЖМТ, а также методики экспериментальных исследований. Здесь среди полученных автором результатов следует выделить критериальную зависимость для определения массоотдачи гранул оксида свинца в свинцовый теплоноситель, температурные зависимости растворимости кислорода в свинце и свинце-висмуте, а также зависимость гидравлического сопротивления слоя гранул потоку ТЖМТ. Данные зависимости необходимы для расчетов производительности и ресурса массообменных аппаратов различных конструкций, разработанных для обеспечения заданных кислородных режимов как в исследовательских стенах, так и в РУ с ТЖМТ.

**Третья глава** диссертации содержит 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 и непрерывной подачей газовой среды, а также капельного типа для неизотермических и изотермических циркуляционных стендов (10 типов МА), а также стационарных установок с ТЖМТ (2 типа МА). Здесь также представлена методика расчетно-экспериментального определения производительности массообменных аппаратов с различными побудителями расхода ТЖМТ через МА. Представлены результаты по технологии получения прессованных гранул PbO для заполнения массообменных аппаратов. По результатам этой разработки при ведущей роли Р.Ш. Асхадуллина подготовлены Технические условия и участок серийного производства гранул PbO на базе АО «ГНЦ РФ

– ФЭИ». Суммарное время работы всех созданных массообменных аппаратов составило более 75 000 ч.

**Четвертая глава** диссертации содержит результаты разработки и обоснования конструкции МА для регулирования содержания (термодинамической активности) кислорода в реакторных установках с интегральной компоновкой первого контура и объемом теплоносителя Pb-Bi до 30 м<sup>3</sup>. 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[O]/ч; производительность МА после первого года эксплуатации РУ  $q_{\text{МА}} \geq 0,15$  г[O]/ч; масса запаса оксида свинца в каждом МА  $m_{\text{PbO}} > 18,3$  кг.

Асхадуллин Р.Ш. выполнил сравнительный расчетный анализ характеристик массообменных аппаратов погружного типа конструкций с внутренним нагревателем, дискретной подачей газовой среды и приводом (перемещаемый МА) при одинаковых исходных данных (внешний диаметр корпуса; высота слоя засыпки; диаметр гранул; температура теплоносителя на входе) для РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем. Автором выполнено экспериментально-расчетное обоснование применения в перспективных РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем конструкции массообменного аппарата со встроенным нагревателем. Экспериментально доказано, что МА с внутренним нагревателем позволяет вводить в теплоноситель растворенный кислород с производительностью (1,3 ± 0,4) г[O]/ч при мощности нагревателя 4 кВт.

**В пятой главе** диссертационной работы Асхадуллиным Р.Ш. представлены результаты разработки и обоснования конструкции МА для перспективных реакторных установок со свинцовым теплоносителем интегральной компоновки (с загрузкой свинца до 1000 м<sup>3</sup>). Автором сформулированы требования к массообменным аппаратам для подобных РУ, выполнен сравнительный анализ различных конструкций массообменных аппаратов. Обоснована конструкция массообменного аппарата со встроенным насосом и производительностью (45±10) г[O]/ч при расходе Pb 5,5 м<sup>3</sup>/ч, температуре 420 °C и высоте слоя засыпки гранул PbO не менее 1 м. Даны рекомендации по разработке массообменных аппаратов со встроенным насосом для перспективных реакторных установок со свинцовым теплоносителем.

Достоверность полученных результатов обеспечивается их воспроизводимостью, а также использованием аттестованных средств измерений и методик.

Работа в целом выполнена доказательно, грамотно научно-технически изложена и аккуратно оформлена. Все главы логичны и последовательны, хорошо структурированы. Диссертация отвечает высокому уровню научной новизны, теоретической и практической значимости.

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. Результаты, представленные в диссертации, прошли апробацию на многочисленных международных, российских и отраслевых конференциях и семинарах.

Положения и результаты, представленные в автореферате, соответствуют тексту диссертации.

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

1. Чем вызвано ограничение допустимого содержания кислорода в ТЖМТ рамками диапазона  $(1-4) \cdot 10^{-6} \text{ % мас.}$ ?

2. Есть ли оценка максимально допустимого времени эксплуатации реакторной установки со свинцовым или свинцово-висмутовым теплоносителем в режиме, когда содержание кислорода в ТЖМТ превышает либо оказывается меньше заданного кислородного режима?

3. Как зависит массоотдача гранул оксида свинца от способа их изготовления (прессование, плавление порошка PbO с последующей кристаллизацией и др.)?

4. Как изменится производительность массообменного аппарата для поддержания заданного кислородного режима, если в процессе работы реакторной установки заменят, например, 10 % тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора на свежие (для условий РУ, рассмотренных в главе 5)?

5. Следовало бы привести больше литературных ссылок на формулы по химической термодинамике, приведённые в главе 1.

Данные вопросы дискуссионного характера и замечание не снижают достоинств работы и её общей положительной оценки. В целом, диссертация производит впечатление значительного научного труда в виде законченного исследования, выполненного на высоком научно-техническом уровне.

Считаю, что диссертационная работа «Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкокометаллических теплоносителях (свинец, свинец-висмут) исследовательских стендов и перспективных

реакторных установок» соответствует п.п. 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  
ИВТЭ УрО РАН,  
член – корр. РАН, профессор,  
доктор химических наук

Зайков Ю.П.

«11» декабря 2025 г.

Почтовый адрес: 620066, Свердловская область,  
г. Екатеринбург, ул. Академическая, стр. 20

Телефон:  
+7 (343) 374-50-89  
E-mail: zaikov@ihte.ru

Подпись Зайкова Ю.П. удостоверяю

Ученый секретарь ИВТЭ УрО РАН

Кодинцева А.О.

