

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Красина Валерия Павловича на диссертационную работу

Асхадуллина Радомира Шамильевича на тему: «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 учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»

**Актуальность темы.** Современная ядерная энергетика в основном представлена водо-водяными реакторами, работающими на тепловых нейтронах. Однако существует ряд проблем, связанных с накоплением большого количества радиоактивных материалов в виде отработавшего ядерного топлива. Сокращение этих отходов и достижение более эффективного использования отработавшего ядерного топлива возможно при создании реакторов на быстрых нейтронах, которые разрабатываются в рамках реакторов четвертого поколения (Generation-IV). Одним из наиболее перспективных направлений развития является строительство реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем или с теплоносителем на основе эвтектики свинец-висмут с замкнутым топливным циклом.

В настоящее время в нашей стране проводятся интенсивные исследования, целью которых является разработка технологии свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей, которая включает методы и средства очистки теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура, в том числе поверхностей ТВС, контроль и регулирование содержания примесей, противокоррозионную защиту стали, исходную подготовку теплоносителя, обращение с теплоносителем при ремонте и перегрузке, подготовку теплоносителя к повторному использованию.

Одним из эффективных методов снижения агрессивности свинцового или свинцово-висмутового теплоносителя по отношению к конструкционным материалам является поддержание содержания кислорода в теплоносителе на определенном уровне для формирования защитного оксидного покрытия. 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-эррозионное разрушение сталей в течение всего срока эксплуатации реакторной установки, так как для герметичных неизотермических циркуляционных контуров с тяжелыми жидкокометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) характерно естественное раскисление теплоносителя (самопроизвольное снижение содержания растворенного в нем кислорода) вплоть до достижения состояния, при котором начинается диссоциация защитных покрытий и разви-

тие коррозионно-эрэзионных 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. При этом содержание кислорода в ТЖМТ уменьшается. Темп и глубина раскисления тяжелого жидкокометаллического 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 стальном контуре защитных оксидных покрытий и их сохранение при эксплуатации, необходимы непрерывный контроль содержания кислорода, растворенного в тяжелом жидкокометаллическом теплоносителе, и регулируемая подпитка ТЖМТ растворенным кислородом.

Опыт последних лет показал, что применение в создаваемых реакторных установках ранее разработанных устройств и методов контроля содержания в ТЖМТ кислорода и подпитки тяжелого жидкокометаллического теплоносителя растворенным кислородом неэффективно. Возникла острая необходимость разработки нового эффективного и безопасного метода регулирования темодинамической активности (ТДА) примеси растворенного кислорода в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителях создаваемых реакторных установок и исследовательских стендов (установок), а также надежных устройств его практической реализации.

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.

Отмеченные выше обстоятельства определяют несомненную актуальность тематики диссертационной работы Асхадуллина Р.Ш. «Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкокометаллических теплоносителях (свинец, свинец–висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок», в которой представлены результаты экспериментально-расчетного обоснования 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).

**Краткая характеристика основного содержания работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы составляет 357 страниц, включает 171 рисунок, 55 таблиц и список литературы из 197 наименований. Диссертация хорошо структурирована и оформлена, написана ясным и лаконичным языком.

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

В первой главе выполнен анализ существующих методов и средств контроля и регулирования содержания примеси растворенного кислорода в циркуляционных контурах и установках с тяжелыми жидкокометаллическими теплоносителями (Pb, Pb–Bi).

В первой главе диссертационной работы выполнены: обзор физико-химических процессов с участием примеси кислорода в теплоносителях Pb и Pb–Bi; анализ методов контроля содержания (термодинамической активности) примеси растворенного кислорода в ТЖМТ; анализ рекомендованных диапазонов содержания примеси растворенного кислорода в неизотермических контурах ЯЭУ и исследовательских стендов с теплоносителями Pb и Pb–Bi для пассивационного и эксплуатационного режимов работы; анализ результатов исследований температурного распределения примесей кислорода и железа в расплавах свинца и свинцависмута. Рассмотрены достоинства и недостатки известных методов регулирования содержания (ТДА) примеси растворенного кислорода.

Во второй главе диссертации представлены новые результаты физико-химических исследований в обоснование применения твердофазного метода регулирования содержания (термодинамической активности) примеси растворенного кислорода в свинцовом (свинцово-висмутовом) теплоносителе. В этой главе описаны 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. Здесь также приведены результаты экспериментально-расчетного определения гидравлического сопротивления слоя засыпки гранул PbO при прохождении потока ТЖМТ. Показано, что 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 третьей главе диссертационной работы представлены результаты разработки и обоснования конструкций массообменных аппаратов (МА) для исследовательских стендов и установок с теплоносителями Pb и Pb–Bi. В ходе выполненных работ созданы конструкции МА со встроенным 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.

В этой главе также сформулирована концепция автоматизированного регулирования ТДА кислорода в ТЖМТ с использованием МА, выбран необходимый состав системы автоматизированного регулирования (САР) ТДА кислорода в ТЖМТ, разработана ее 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. 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 четвертой главе диссертационной работы 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  $30\text{ м}^3$ .

Обоснована конструкция МА со встроенным нагревателем. Производительность каждого из четырех массообменных аппаратов по растворенному кислороду, подаваемому в свинец-висмут, составила  $(1,3 \pm 0,4)\text{ г [O]/ч}$  при мощности нагревателя 4 кВт. Автором даны рекомендации по разработке массообменного аппарата для РУ с СВТ.

В пятой главе 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  $1000\text{ м}^3$ . Обоснована конструкция МА со встроенным насосом. Производительность каждого из четырех массообменных аппаратов РУ по растворенному кислороду, подаваемому в свинцовый теплоноситель, составила  $(45 \pm 10)\text{ г [O]/ч}$  при расходе Pb  $5,5\text{ м}^3/\text{ч}$ , температуре  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  и высоте слоя засыпки гранул PbO не менее 1 м.

Рассмотрена также альтернативная конструкция МА с регулировочным клапаном. Проанализированы условия пригодности данной конструкции. Автором даны рекомендации по разработке массообменного аппарата со встроенным насосом для РУ со свинцовым теплоносителем.

В заключении представлены основные выводы по результатам диссертационной работы.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.** Выводы, сделанные в диссертационной работе и положения, выносимые на защиту, являются хорошо обоснованными и достоверными. Проведенные экспериментальные исследования выполнены с использованием современных методов и оборудования. Выводы диссертации апробированы в научных исследованиях, докладывались на

международных, российских и отраслевых конференциях и подтверждены практическим применением. Достоверность основных научных положений и выводов обеспечивается воспроизводимостью результатов экспериментов, использованием на экспериментальных стендах современных методик исследования и метрологически аттестованных приборов. Асхадуллин Р.Ш. непосредственно участвовал в разработке 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 научно-исследовательских и конструкторских организаций.

**Новизна научных положений и выводов** не вызывает сомнений. Этот вывод базируется на следующих положениях:

(1) Впервые проведено экспериментально-расчетное исследование кинетики растворения гранул PbO в расплавленном свинце в зависимости от температуры и скорости ТЖМТ, количества слоев (высоты засыпки) гранул оксида PbO.

(2) Впервые разработаны различные конструкции массообменных аппаратов, аппаратура для исследовательских стендов и установок с ТЖМТ и реализована их длительная эксплуатация в составе экспериментальных стендов.

(3) Впервые разработана конструкция массообменного аппарата для реакторной установки со свинцово-висмутовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура (с объемом теплоносителя до 30 м<sup>3</sup>).

(4) Впервые разработана конструкция массообменного аппарата для реакторной установки со свинцовым теплоносителем с интегральной компоновкой первого контура (с объемом теплоносителя до 1000 м<sup>3</sup>).

**Значимость полученных результатов** заключается в том, что в результате проведенных автором диссертации исследований решены задачи по разработке устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в ТЖМТ, по их изготовлению, испытаниям, адаптации к технологическим процессам, по их внедрению в состав систем технологии тяжелого жидкокометаллического теплоносителя (свинец, свинец-висмут) на исследовательских стендах для обеспечения заданного качества теплоносителя и проведения длительных ресурсных испытаний конструкционных сталей и изделий (компонентов). Отдельно следует выделить практическую значимость применения результатов диссертации Асхадуллина Р.Ш. – их использование при разработке технических проектов массообменных аппаратов для обеспечения длительной коррозионной стойкости жидкокометаллических контуров и оборудования (тепловыделяющие сборки активной зоны, парогенераторы, циркуляционные насосы и др.) проектируемых реакторных установок «БРЕСТ-ОД-300», «СВБР-100», а также в перспективе и «БР-1200», и «МАСММ».

**Соответствие содержания диссертации содержанию и качеству опубликованных работ.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 113

работ, 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). Опубликованные работы и автореферат достаточно полно отражают содержание диссертации.

К диссертации имеется несколько вопросов и замечаний:

1. В разделе 2.1.1 диссертации при проведении расчетной оценки границ диапазона активностей кислорода в свинце, в котором поступлением кислорода в жидкий свинец из керамики  $Al_2O_3$  можно пренебречь, в правой части уравнения реакции (2.12) на стр. 90 присутствует слагаемое  $3 \cdot [PbO]$ . Было бы более корректно в этом уравнении слагаемое  $3 \cdot [PbO]$  заменить на другое слагаемое  $3 \cdot [O]_{Pb-Al}$  (здесь под  $[O]_{Pb-Al}$  следует понимать раствор кислорода в двухкомпонентном металлическом расплаве Pb-Al). Такая замена, по моему мнению, представляется обоснованной в связи с тем, что в отличие кремния и циркония растворимость алюминия в жидким свинце нельзя считать пренебрежимо малой величиной, как это сделано в рассматриваемой здесь диссертации. По данным монографии: Арнольдов М.Н., Соловьев В.А., Комраков Г.С., Шорина Л.М. «Растворимость элементов в жидким свинце» – М. ИздАТ, 2015 при температуре 550 ° С растворимость алюминия в жидким свинце составляет 0,46 ат. % Al. С учетом такой поправки и, принимая во внимание большое по абсолютной величине отрицательное значение параметра взаимодействия между алюминием и кислородом в жидким свинце ( $\varepsilon_{Al}^O \approx -10^5$  при 550 ° С, иногда этот параметр называют параметром Вагнера), результат численных вычислений, получился бы несколько иным, по сравнению с тем, что соискатель приводит в таблице 2.6 на стр. 92.

2. В разделе 1.1.3 при обсуждении роли регулирования содержания примеси растворенного кислорода в свинце и свинце-висмуте для обеспечения коррозионной стойкости контактирующих с ними конструкционных сталей было бы полезно привести сведения о характерных временах, необходимых для осуществления первичной пассивации конструкционных сталей в реакторных установках с ТЖМТ, а также о факторах, влияющих на длительность этого процесса.

3. Для экспериментальных исследований производительности массообменных аппаратов автор использовал специальное устройство в составе стендов (глава 3, рис. 3.52) – источник металлических примесей (ИМП). Представляет интерес вопрос о ресурсе работы ИМП. Другими словами, как часто приходилось производить замену стружки из стали 3 в ИМП для обеспечения отвода кислорода в ТЖМТ из испытываемых на стенде массообменных аппаратов?

4. Анализируя возможности метода регулирования термодинамической активности (ТДА) кислорода с помощью газовых смесей, в диссертации совершенно справедливо используются уравнения (1.27) и (1.28), связывающие активности кислорода в свинце и свинцово-висмутовой эвтектике с парциальными давлениями

$\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в газовой фазе. К сожалению, приводя эти уравнения, соискатель не указал диапазоны ТДА кислорода, в которых эти уравнения применимы.

5. В разделе 3.2 диссертации, в котором обосновывается технология получения гранул  $\text{PbO}$  для загрузки в массообменные аппараты различных типов, указано, что в качестве способа получения гранул  $\text{PbO}$  для заполнения массообменных аппаратов было выбрано прессование из порошка оксида свинца. По моему мнению, в этом разделе было бы полезно привести аргументы, показывающие преимущества этого метода перед другим, в котором для получения гранул  $\text{PbO}$  используется выдавливание расплавленного материала через фильтеру.

Отмеченные замечания не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации. Поэтому, на основе изученной диссертации, автореферата и опубликованных работ соискателя оппонент дает работе положительную оценку.

**Заключение по диссертации.** Диссертационная работа Асхадуллина Радомира Шамильевича «Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкокометаллических теплоносителях (свинец, свинец–висмут)» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой изложены новые научно-технические и конструкторские решения в области технологии тяжёлых жидкокометаллических теплоносителей для реакторных установок нового поколения.

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.

Диссертация «Разработка устройств регулирования содержания примеси растворенного кислорода (массообменных аппаратов) в тяжелых жидкокометаллических теплоносителях (свинец, свинец–висмут) исследовательских стендов и перспективных реакторных установок» отвечает всем 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), а соискатель Асхадуллин Радомир Шамильевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

Официальный оппонент:  
доктор физико-  
математических наук, про-  
фессор,  
профессор кафедры «Фи-  
зики» ФГАОУ ВО «Мос-  
ковский политехнический  
университет»

ПОДПИСЬ *Красин В.П.* заверяю



Почтовый адрес:  
107023, г. Москва, ул.  
Большая Семёновская, 38.  
Телефон: +7 9168724992  
E-mail: vkrasin@rambler.ru