

На правах рукописи

Молодцов Антон Анатольевич

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕНА ОТ СВИНЦОВОГО
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОБОРУДОВАНИИ ЯЭУ ПРИ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ СОДЕРЖАНИИ В НЕМ ПРИМЕСЕЙ**

05 04 11 - Атомное реакторостроение, машины, агрегаты
и технология материалов атомной промышленности

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



0030594 10

2007

Нижний Новгород

2007

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Anton'.

Работа выполнена на кафедре «Атомные, тепловые станции и медицинская инженерия» Нижегородского государственного технического университета

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
Безносов Александр Викторович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Жуков Альберт Владимирович
кандидат технических наук
Никаноров Олег Леонидович

Ведущая организация — Научно – исследовательский и
конструкторский институт энерготехники
им Н А Доллежалея, г Москва

Защита состоится «29» мая 2007г в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.165 03 при Нижегородском государственном техническом университете 603600, г Нижний Новгород, ул Минина, д 24, корп 5, ауд 5232.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета

Автореферат разослан «27» апреля 2007 г

Ученый секретарь
диссертационного совета

д т н , профессор

Дмитриев С М

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В СССР и специалистами ряда стран в середине прошлого века был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований характеристик теплообмена в системах с жидкометаллическими теплоносителями – натрием, калием, сплавами натрия-калий, литием, ртутью, эвтектикой свинец-висмут и др. Интерес к проведению таких исследований был вызван, в основном, потребностями поиска оптимальных теплоносителей - для реакторов деления тяжелых ядер для атомных подводных лодок первого поколения в США и в СССР (натрий и эвтектика свинец-висмут), - для генерирующих ядерное топливо реакторов деления на быстрых нейтронах типа БН (натрий и др.), - для бортовых реакторных установок и других ядерных источников энергии космических аппаратов (эвтектика натрия-калий, калий, литий), - для импульсных реакторов (ртуть и др.), - для «самоохлаждаемого» blankets реактора синтеза легких ядер, (литий) с воспроизводством трития – топлива для термоядерного ядерного реактора, а также для использования в других областях (энергетика и др.)

Методики расчета и расчетные выражения использованные для проектирования поверхностей теплообмена (кроме единичных проектных ошибок) всегда обеспечивали «запас» теплообменных поверхностей, существенно превышающий необходимый при выполнении инженерных расчетов

Избыточные «запасы» теплообменных поверхностей ухудшали экономические показатели жидкометаллических контуров и систем. Однако, учитывая специфику изделий, для которых показатели экономичности не являлись определяющими, а также существовавшее мнение, что любые «запасы» поверхностей теплообмена, уменьшая их теплонапряженность, повышают ресурсную надежность и безопасность изделия в целом, не способствовали выявлению величин фактических «запасов» поверхностей теплообмена и корректировки соответствующих расчетных методик теплообмена

Необходимо отметить, что экспериментальные исследования, посвященные теплоотводу от ТЖМГ практически не проводились, так как, во-

первых основное внимание было уделено задачам, связанным с охлаждением активной зоны, во-вторых задача теплоотвода подразумевалась симметричной (что обоснованно в случае «чистых» теплоносителя и теплообменных поверхностей)

Для решения указанных задач в настоящее время разрабатываются научно-технические основы и технологии применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в новых условиях. Появились новые средства контроля содержания примесей, новые средства вычислительной и измерительной техники

В связи с этим актуальной является разработка (уточнение) расчетных методик, расчетных формул теплообмена в системах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями при контролируемом и регулируемом содержании примесей в контуре, прежде всего, примеси кислорода, а также в период и после аварийных ситуаций, связанных с резким и значительным изменением содержания и физико-химического состояния примесей в контуре и в теплоносителе в условиях теплоотвода от жидкого металла

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка рекомендаций по расчетным формулам теплообмена от свинцового теплоносителя при возможных эксплуатационных состояниях теплоносителя и контура

Задачи работы:

- проведение анализа накопленных в исследуемой области данных,
- разработка и создание высокотемпературных циркуляционных теплофизических стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями с температурой 380 – 600°С,
- моделирование теплообмена в ПГ при низком давлении среды, отводящей тепло, за счет использования ТЖМТ в контуре теплоотвода
- разработка, создание и внедрения средств циркуляции, управления и автоматики для высокотемпературных циркуляционных теплофизических стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями,
- разработка и экспериментальная отработка методов контроля и регулирования примеси кислорода в свинцовом теплоносителе при проведении теплофизических исследований,

– разработка и отработка методов измерения и компьютерной обработки температуры, термодинамической активности кислорода в свинце и др информационных сигналов от датчиков, расчета и представления теплофизических параметров в режиме реального времени,

– проведение комплексных экспериментальных исследований влияния контролируемого регулирования содержания примесей на характеристики теплообмена при отводе тепла от потока свинца в вертикально и горизонтально ориентированной кольцевой щели,

– проведение экспериментальных исследований по очистке контура от примесей двухкомпонентными смесями свинец-газ и ее влияние на характеристики теплообмена при теплообмене от свинца в кольцевой щели,

– разработка выражений для инженерных расчетов теплоотвода от свинцового теплоносителя к стенке на основе проведенных исследований для различных содержаний примесей в контуре

На защиту выносятся следующие положения:

- Методология исследований теплофизических характеристик при отводе тепла от тяжелых жидкометаллических теплоносителей к стенке с контролем и управлением содержания примеси кислорода в ядре потока и в пристенной области

- Массив экспериментальных результатов испытаний характеристик теплообмена ($Nu = f(Re)$ и контактного термического сопротивления) при отводе тепла от свинцового теплоносителя при температуре 450-550 °С в вертикально ориентированной кольцевой щели при содержании примеси кислорода в диапазоне нормальных и аварийных условий в энергетических контурах в диапазоне чисел Пекле 600 - 6000

- Массив экспериментальных результатов испытаний характеристик теплообмена ($Nu = f(Re)$ и контактного термического сопротивления) при отводе тепла от свинцового теплоносителя при температуре 450-550 °С применительно к условиям горизонтального парогенератора предложенной с участием автора новой конструкции реакторной установки с ТЖМТ при содержании примеси кислорода в диапазоне нормальных и аварийных условий в энергетических контурах в диапазоне чисел Пекле 600 - 6000

- Результаты исследований по влиянию очистки двухкомпонентными

потоками свинец-газ на характеристики теплообмена при отводе тепла от свинцового теплоносителя в кольцевой щели с контролем и управлением содержания примеси кислорода в ядре потока и в пристенной области

Научная новизна

Разработана методология исследований теплофизических характеристик при охлаждении тяжелых жидкометаллических теплоносителей с контролем и управлением содержания примесей кислорода

Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования характеристик теплообмена при охлаждении свинцового теплоносителя в вертикальной и горизонтальной кольцевой щели при контролируемом и регулируемом содержании примеси кислорода в свинце и в контуре и получены зависимости $Nu=f(Re)$ и контактного термического сопротивления в диапазоне чисел Пекле 600–6000 при контролируемом и регулируемом содержании примеси термодинамически активного кислорода 10^{-5} – 10^0 и отложений примесей

Практическая значимость

Рекомендованы для проведения инженерных расчетов экспериментально полученные критериальные зависимости теплообмена при отводе тепла от свинцового теплоносителя в вертикальной и горизонтальной кольцевой щели при эксплуатационных и аварийных содержаниях примеси кислорода в теплоносителе и контуре, включая аварийные, что существенно повышает качество расчетов и позволяет улучшить массогабаритные характеристики теплообменного оборудования установки в целом

Результаты исследований влияния на характеристики теплообмена очистки теплоотводящих поверхностей (условия парогенераторов) двухкомпонентными потоками теплоноситель – газ рекомендованы для использования при создании систем очистки и режимов их эксплуатации

Предложена и отработана методика проведения теплофизических исследований с отводом тепла от ТЖМТ с контролем и регулированием эксплуатационных содержаний примесей в теплоносителе и в контуре, которая рекомендуется для экспериментов со свинцовым и другими ТЖМТ, что повышает качество и представительность полученных результатов

Личный вклад автора

Все расчетные, теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых приведены в настоящей работе, а так же подготовка, проектирование и монтаж, отладка экспериментального участка и оборудования, включая циркуляционный насос для подачи свинца выполнены непосредственно автором или при его участии

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на международной конференции Теплофизика-2002 в г Обнинске, на Российском научно-техническом форуме «Ядерные реакторы на быстрых нейтронах» г Обнинск, 2003г., на шестой международной научной конференции Полярное сияние г С Петербург, 2003г, на одиннадцатой международной конференции Материалы реакторов синтеза г Киото, Япония, 2003г., на Второй курчатовской молодежной научной школе г Москва, 2004г, на Российской межотраслевой тематической конференции Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах г Обнинск, 2005г, на Третьей курчатовской молодежной научной школе г Москва, 2005г, на Четвертой курчатовской молодежной научной школе г Москва, 2006г

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в трех патентах РФ на изобретение, в одном патенте РФ на полезную модель, пяти зарегистрированных научно-технических отчетах, двадцати семи докладах на отечественных и международных научных конференциях, в статьях в журнале «Вестник атомной науки и техники», в статье в журнале «Атомная энергия», в статьях в журнале «Известия высших учебных заведений Ядерная энергетика», в статье в журнале (по-английски) «Journal of nuclear materials»

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, пяти приложений Объем работы составляет 296 страниц, 169 рисунков, 15 таблиц, список использованных источников из 84 наименований, в том числе 45 работ автора

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации.

определяются цель и задачи исследования, приводится общая характеристика работы

В первой главе анализируется и обосновывается возможность применения ТЖМТ в атомной энергетике, производится постановка задач исследований

Проведенный анализ характеристик свинца и эвтектики свинец-висмут показывает возможность их применения в качестве теплоносителя в реакторах деления тяжелых ядер

Во второй главе рассматриваются физико-химические основы и технология контроля и регулирования примесей в свинце и их влияние на характеристики теплообмена. Необходимым условием безопасной эксплуатации установок, охлаждаемых тяжелым жидкометаллическим теплоносителем является формирование и поддержание защитных оксидных покрытий на внутренних поверхностях контуров ТЖМТ и недопущение образования отложений примесей на теплообменных и других поверхностях энергетических контуров. Кроме того, интенсивность процессов теплообмена в контурах с ТЖМТ существенно зависит от состава, формы состояния и содержания примесей в контуре.

Контроль и регулирование соответствующей величины окислительного потенциала кислорода в теплоносителе определяет формирование и поддержание в работоспособном состоянии защитных оксидных покрытий на конструкционных материалах в свинцовом теплоносителе и определяет процесс поступления примесей – компонент конструкционных материалов в поток теплоносителя и диффузию примесей через пограничный слой жидкого металла. При отсутствии контроля процесса и проведения соответствующих мероприятий возникает опасность, как перенасыщения контура кислородом и его “заплавывания”, так и разрушение покрытий за счет, восстановления, входящих в них оксидов (Fe_3O_4 и др.)

Для контроля содержания термодинамически активного кислорода в свинцовом теплоносителе во время теплофизических исследований на стенде ФТ-2А использовались датчики на основе твердого гальванического концентрационного элемента, конструкции ГИЦ РФ ФЭИ (ДАК-45) и др. с индивидуальными градуировочными характеристиками, как наиболее

оперативный метод контроля состояния теплоносителя

Ввод кислородосодержащих веществ, H_2 , Ar и He в свинцовый контур (в его газовую систему или погон теплоносителя) осуществлялся, и прекращался на основе анализа информации от датчиков термодинамически активного кислорода, расположенных в контуре, после установления стабильных показаний

Исследованы и отработаны технологии восстановления свинцового теплоносителя и контура водородосодержащими восстановительными газовыми смесями подачей их в газовый объем с изливом теплоносителя на свободный уровень и эжекцией потоком теплоносителя при проведении теплофизических экспериментов в указанных условиях

Показано, что контактное термическое сопротивление и характеристики теплообмена всегда обратно пропорционально зависят от термодинамической активности кислорода в теплоносителе при условии стабилизации массообменных процессов в контуре

В Третьей главе представлены результаты проведенных автором исследований, целью которых являлось определение характеристик теплоотдачи от свинца к стенке охлаждаемой трубы в условиях регулирования и контроля примеси кислорода в теплоносителе и контуре

Экспериментальный стенд ФТ-2А предназначен для проведения исследований теплообмена от свинцового теплоносителя к продольно обтекаемой круглой трубе (условия трубной системы парогенераторов и теплообменников) с регулируемым содержанием примеси кислорода в свинце

Отвод тепла в экспериментальном участке для расширения температурного диапазона измерений осуществляется эвтектическим сплавом свинец-висмут, подаваемым от стенда ФТ1-ГО Данное техническое решение позволяет проводить исследования теплообмена от свинца к стенке без применения водяного контура с критическим давлением

Экспериментальный участок выполнен в виде вертикально ориентированных коаксиально расположенных труб ($d_2/d_1 = 2,35$) (Рис 1) Внешняя труба длиной 1348 мм, 45x2,5 мм изготовлена из аустенитной стали 12X18H10T Внутренняя труба длиной 2095мм, 17x3 мм изготовлена из

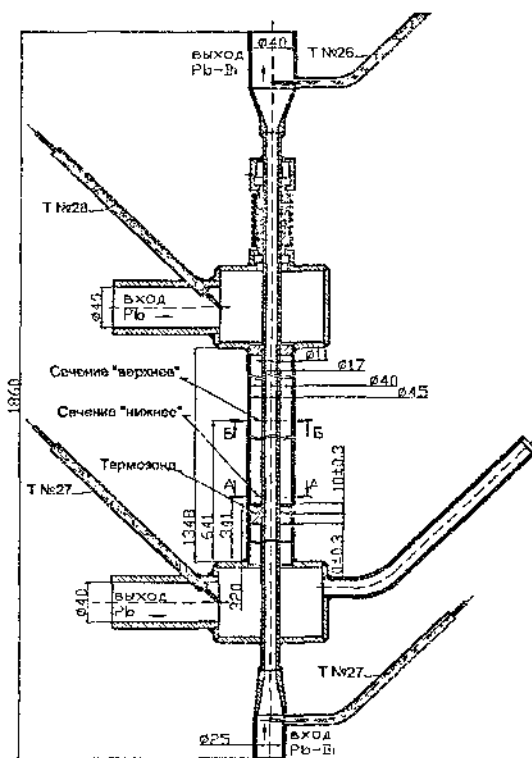


Рис. 1 Общий вид
экспериментального участка

соответствующих этапах испытаний экспериментального участка

В штатном диапазоне термодинамической активности кислорода (10^{-3} - 10^{-5}) параметры теплообмена на охлаждаемой поверхности варьируются между зависимостями (1) - наилучший случай (при т/д активности кислорода 10^{-4} и меньше и длительной водородной регенерации) и (2)

$$Nu = 7 + 0,025 Pe^{0,8} \quad (1)$$

$$Nu = 6,2 + 0,013 Pe^{0,8}, (600 < Pe < 6000 \quad 10^{-4} < a < 10^{-2}) \quad (2)$$

В нештатном диапазоне термодинамической активности кислорода (5×10^{-1} - 10^{-2}) в зависимости от предыстории контура изменение характеристики теплообмена описывается зависимостями соответственно

ферритно-мартенситной стали 10Х9НСМФБ По внутренней трубе осуществляется циркуляция свинца-висмутового (Pb-Bi) теплоносителя, подвод теплоносителя осуществлен снизу, отвод сверху ЭУ В объем между внешней и внутренней трубой осуществляется циркуляция свинцового (Pb) теплоносителя, подвод теплоносителя осуществлен сверху, отвод снизу ЭУ

По результатам исследований, были построены графики (рис 2 - б) зависимости локальных значений чисел Нуссельта во всех сериях и в

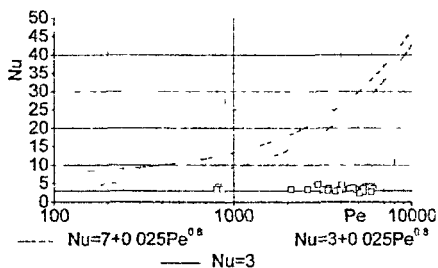


Рис 2 Локальные характеристики теплообмена, сводный график Избыток кислорода по отношению к насыщению

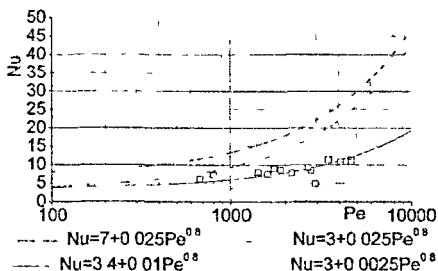


Рис 3 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, саморегулирование контура в атмосфере Ar, т/д активность кислорода $10^{-1} < a < 10^0$

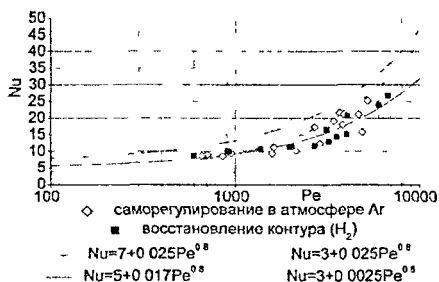


Рис 4 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, т/д активность кислорода $10^{-2} < a < 10^{-1}$

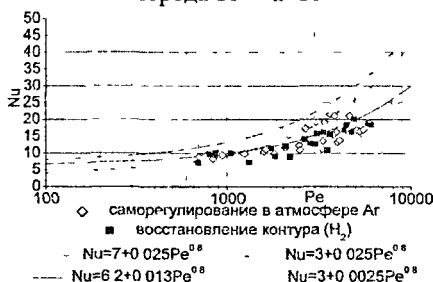


Рис 5 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, т/д активность кислорода $10^{-3} < a < 10^{-2}$

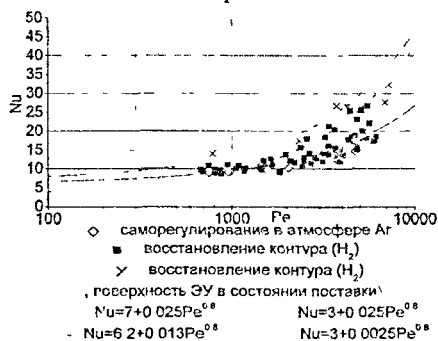


Рис 6 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, т/д активность кислорода $10^{-3} < a < 10^{-4}$.

увеличению термодинамической активности кислорода

$$Nu = 4,5 + 0,017 Pe^{0,8}, \quad (600 < Pe < 6000, 10^{-2} < a < 10^{-1}) \quad (3)$$

$$Nu = 3,4 + 0,01 Pe^{0,8} \quad (600 < Pe < 6000, 10^{-1} < a < 0,5) \quad (4)$$

При этом в диапазоне чисел Пекле 1000 . 3000 (так как экспериментальные данные

соответствующих серий измерений в этом промежутке очень близки) характеристики теплообмена описываются зависимостью

$$Nu = 5,25 + 0,015 Pe^{0,8} \quad (1000 < Pe < 3000, 0,5 < a < 10^{-2}) \quad (5)$$

Характеристики теплообмена с введением значительного количества кислорода, образующего массы отложений нерастворимых оксидов свинца стремятся к определенной асимптоте В данной серии экспериментов худшие характеристики теплообмена можно описать зависимостью

$$Nu = 2, \quad (600 < Pe < 6000) \quad (6)$$

В Четвертой главе представлены результаты проведенных автором исследований, целью которых являлось определение, характеристик теплоотдачи от свинца к стенке охлаждаемой горизонтальной трубы в условиях регулирования и контроля примеси кислорода в теплоносителе и контуре

Проведенные экспериментальные исследования, а также расчетно-теоретический анализ дали основания при участии автора, совместно со специалистами ОКБ «Гидропресс», предложить новую конструктивную схему для установок со свинец-висмутовым и со свинцовым теплоносителями Эта конструктивная схема обеспечивает безопасность реакторных установок такого типа при любой аварии с межконтурной неплотностью парогенератора, включая одновременное разрушение всех труб трубной системы парогенератора Предложено выполнять рабочую поверхность трубной системы парогенератора из горизонтальных труб с минимальным заглублением труб под уровень жидкого металла Характеристики теплообмена горизонтальных трубок были неизвестны

Экспериментальный участок выполнен горизонтально с уклоном 3° по движению свинца в виде коаксиально расположенных труб ($d_2/d_1 = 2,35$) (Рис 7) Внешняя труба длиной 1348 мм, 45x2,5 мм изготовлена из аустенитной стали 12Х18Н10Т Внутренняя труба длиной 2095мм, 17x3 мм изготовлена из ферритно-мартенситной стали 10Х9НСМФБ

По внутренней трубе осуществляется циркуляция свинец-висмутового (Рв-В1) теплоносителя, подвод теплоносителя осуществлен снизу, отвод сверху по уклону ЭУ В объем между внешней и внутренней трубой осуществляется циркуляция свинцового (Рб) теплоносителя, подвод теплоносителя

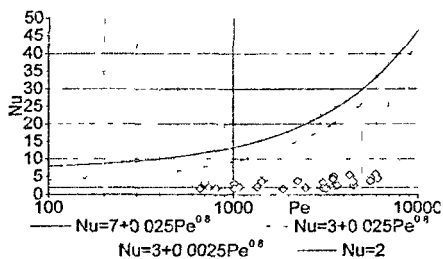


Рис 8 Локальные характеристики теплообмена, сводный график Избыток кислорода по отношению к насыщенню

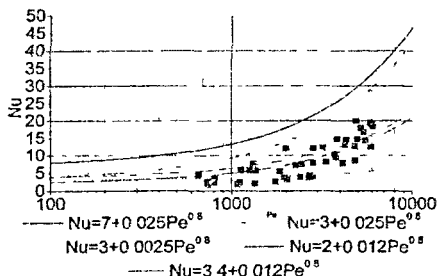


Рис 9 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, саморегулирование контура в атмосфере Ar и He, т/д активность кислорода $10^{-1} < a < 10^0$

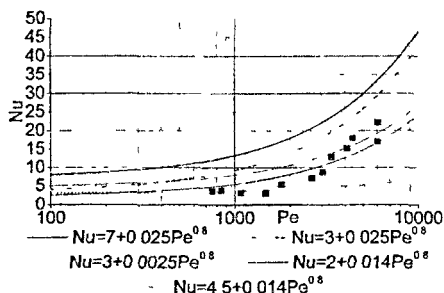


Рис. 10 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, восстановление контура (H₂), т/д активность кислорода $10^{-2} < a < 10^{-1}$

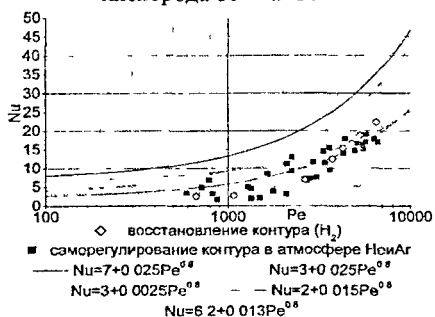


Рис 11 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, т/д активность кислорода $10^{-3} < a < 10^{-2}$

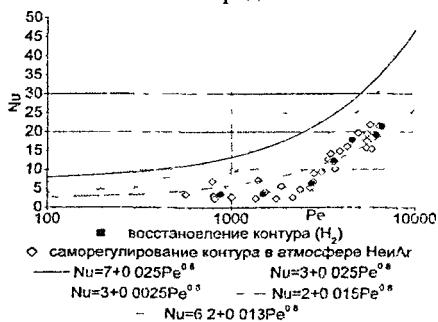


Рис 12 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, т/д активность кислорода $10^{-3} < a < 10^{-4}$

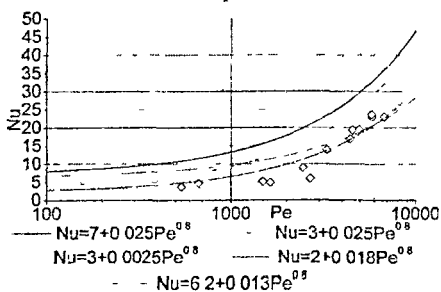


Рисунок 13 Локальные характеристики теплообмена, сводный график, восстановление контура (H₂), т/д активность кислорода $10^{-4} < a < 10^{-5}$

Характеристики теплообмена с введением значительного количества кислорода, образующего массы отложений нерастворимых оксидов свинца стремятся к определенной асимптоте. В данной серии экспериментов худшие характеристики теплообмена можно описать зависимостью

$$Nu = 2, (600 < Pe < 6000) \quad (10)$$

Следует отметить, что в режимах восстановления оксидов (ввод водорода) и режимах с атмосферой инертных газов (аргон, гелий), полученные зависимости описываются двумя кривыми. В диапазоне чисел $Pe = 600 - 3000$ ($Re = 39000 - 200000$) и т/д активности кислорода $10^{-5} - 10^0$ можно представить зависимость

$$Nu = 2,5, (600 < Pe < 3000, 10^{-5} < a < 10^0) \quad (11)$$

В диапазоне чисел $Pe = 3000 - 6000$ ($Re = 200000 - 400000$) и термодинамической активности кислорода ($10^{-5} - 10^{-2}$) параметры теплообмена на охлаждаемой поверхности можно представить зависимостью

$$Nu = 6,2 + 0,013 Pe^{0,8}, (3000 < Pe < 6000, 10^{-5} < a < 10^{-2}) \quad (12)$$

В диапазоне чисел $Pe = 3000 - 6000$ ($Re = 200000 - 400000$) и термодинамической активности кислорода ($10^{-2} - 10^{-1}$) параметры теплообмена на охлаждаемой поверхности можно представить зависимостью

$$Nu = 4,5 + 0,014 Pe^{0,8}, (3000 < Pe < 6000, 10^{-2} < a < 10^{-1}) \quad (13)$$

В диапазоне чисел $Pe = 3000 - 6000$ ($Re = 200000 - 400000$) и термодинамической активности кислорода ($10^{-1} - 10^0$) параметры теплообмена на охлаждаемой поверхности можно представить зависимостью

$$Nu = 3,4 + 0,012 Pe^{0,8}, (3000 < Pe < 6000, 10^{-1} < a < 10^0) \quad (14)$$

Зависимости (12) – (14) очень близки к зависимостям, описывающим характеристики теплообмена, полученные на этом же ЭУ при вертикальной ориентации и при соответствующей т/д активности кислорода (2) – (5)

При Pe от 2500 до 3000 происходит переход от зависимости (11) к зависимостям (12) – (14) при соответствующей т/д активности кислорода. Этот факт может быть объяснен влиянием на теплообмен «холодного» слоя стекающего с верхних зон горизонтальной трубы. При $Pe > 3000$ ($Re > 200000$) стратификация отсутствует «холодные» слои перемешиваются и не влияют на теплообмен.

В Пятой главе представлены результаты исследований по определению влияния обработок контура двухкомпонентным потоком ТЖМТ-газ на характеристики теплоотдачи от свинца к стенке в условиях контроля и регулирования примеси кислорода в теплоносителе и контуре

Накопление в циркуляционном контуре примесей ухудшает и характеристики теплообмена и эксплуатационные характеристики энергетической установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем в целом

Применительно к системам с ТЖМТ высокую эффективность показал метод очистки внутренних поверхностей контура тяжелого теплоносителя, самого теплоносителя и его свободной поверхности от оксидов компонент теплоносителя путем ввода в поток циркулирующего в контуре теплоносителя восстановительных газовых смесей

В процессе экспериментов исследовалась очистка теплообменных поверхностей эжектированием потоком свинцового теплоносителя водорода, гелия и аргона с образованием двухкомпонентной смеси свинец-газ

На параметры теплообмена после очистки влияли следующие факторы

- ближайшая предыстория процессов массопереноса в контуре (не более 24ч),

- термодинамическая активность кислорода в теплоносителе и ее изменение,

- применяемый для формирования смеси газ (влияющий или не влияющий на термодинамическую активность кислорода)

Во всех случаях через 1 час после прекращения ввода газа в поток ТЖМТ фиксируются более высокие характеристики теплоотдачи, вероятно, в следствии неполной дегазации контура (пузыри диаметром менее 0,5 мм) и турбулизации пристенного слоя газовыми пузырями

Заметной разницы во влиянии на теплообмен очистки вводом в ТЖМТ гелия и аргона в процессе испытаний отмечено не было

Очистка теплообменной поверхности двухкомпонентным потоком ТЖМГ – газ показала себя действенным инструментом поддержания характеристик теплообмена

В Шестой главе показаны результаты проведенных автором исследований, целью которых являлось определение влияния изменения уточненных автором в процессе исследований характеристик теплоотдачи от ТЖМТ к теплообменной поверхности парогенератора на его интегральные характеристики

Показано, что экспериментально определенное влияние изменения характеристик теплоотдачи при нормальной работе контура по сравнению с существующими расчетными методиками не имеет существенной роли с точки зрения характеристик парогенератора, по крайней мере, при значении термодинамической активности кислорода в ТЖМТ менее 10^{-4}

Предложенное автором уточнение существующих расчетных зависимостей теплоотдачи при теплоотводе от ТЖМТ к поверхности парогенератора позволяет уменьшить запасы теплообменных поверхностей не менее чем на 10% в диапазоне активности 10^{-4} - 10^{-3} по сравнению с нормативным методом

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:

1 Предложена и отработана методика проведения теплофизических исследований теплообмена от теплоносителя к стенке (условия парогенераторов и теплообменников) на стендах со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями, требующая контроля и целенаправленного изменения содержания примесей прежде всего кислорода

2 Исследованы и отработаны технологические методы, направленные на изменение окислительного потенциала свинцового теплоносителя при проведении исследований теплообмена от теплоносителя к стенке в диапазоне температур 450 - 550 °С при значениях чисел $Re = 600 - 6000$ и чисел $Re = 30\ 000 - 300\ 000$

3 Определены и представлены зависимости локальных характеристик теплоотвода от свинцового теплоносителя при продольном обтекании вертикальной круглой трубы в виде $Nu_{\tau} = f(Re)$ для $Re = 600 - 6000$ и $Re = 30\ 000 - 300\ 000$ при температурах 450 - 550 °С в диапазоне термодинамической активности кислорода от 10^0 до 10^5 и при отложениях примесей оксидов теплоносителя

4 Определены и представлены зависимости локальных характеристик теплоотвода от свинцового теплоносителя при продольном обтекании горизонтальной круглой трубы в виде $Nu=f(Re)$ для $Re = 600 - 6000$ и $Re = 30\,000 - 300\,000$ при температурах $450 - 550$ °С в диапазоне термодинамической активности кислорода от 10^0 до 10^{-5} и при отложениях примесей оксидов теплоносителя

5 Исследовано влияние очистки теплообменных поверхностей двухкомпонентными смесями свинец-газ (аргон, гелий, водород) на характеристики теплообмена и подтверждено, что очистка теплообменной поверхности двухкомпонентным потоком ТЖМТ-газ является эффективным способом поддержания характеристик теплообмена

6 Экспериментально подтверждено влияние наличия и толщины оксидных пленок и отложений примесей на поверхности теплообмена на контактное термическое сопротивление и другие характеристики при теплообмене от свинцового теплоносителя к стенке

7 Экспериментально продемонстрировано отличие характеристик теплообмена при теплоотводе от свинцового теплоносителя (его охлаждения), по сравнению с его нагревом при термодинамической активности кислорода от 10^3 до 10^0 и при отложениях примесей оксидов теплоносителя на поверхности теплообмена

8 Полученные критериальные формулы характеристик теплообмена, соответствующих возможным эксплуатационным состояниям теплоносителя и контура рекомендованы для проведения соответствующих инженерных расчетов поверхностей теплообмена

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях и научно-технических отчетах:

1 Optimization of insulating coating formation technology on the structural materials for heavy liquid metal coolants / Pinaev S S, Muraviev E V, Beznosov A V, Molodsov A A // Journal of nuclear materials Elsevier 329-333 - 2004 -P 1419-1423

2 Снижение МГД-сопротивления в каналах с жидкометаллическими теплоносителями в магнитном поле blanketа и дивертора ТОКАМАКа / Безносов А В , Пинаев С С , Муравьев Е В , Молодцов А А // Вестник атомной

науки и техники - М, 2004 – вып 1 - С 3-10

3 Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело / Безносов А В, Пинаев С С, Молодцов А А [и др] // Атомная энергия - М, 2005 - Г 98 - вып 3 - С 182-191

4 Теплоотдача от свинцового теплоносителя к продольно обтекаемой трубе / Безносов А В, Молодцов А А, Семенов А В [и др] // Известия высших учебных заведений Ядерная энергетика -Обнинск, 2006 - Вып 3 - С 83-90.

5 Экспериментальные исследования теплопереноса к свинец-висмутовому теплоносителю в поперечном магнитном поле при изменяемых характеристиках электронизирующих покрытий на ограничивающих стенках / А В Безносов, С Ю Савинов, А А Молодцов [и др] // Вестник атомной науки и техники – М, 2007, вып 1, с 11-25

6 Безносов, А В Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями, и оптимизация его конструкции / Безносов А В, Бокова Т А, Молодцов А А // Известия высших учебных заведений Ядерная энергетика - Обнинск, 2006,- вып 4 - С 61-69

7 Пат 2247435 Рос Федерация МПК(7) G 21 D 9/00 Ядерная энергетическая установка / Безносов А В, Бокова Т А, Давыдов Д В Пинаев С С, Молодцов А А, Титов А Ю, заявитель и патентообладатель Нижегородский государственный технический университет -№2003121666/06, заявл 14 17 2003, опубл 27 02 2005 Бюл № 6 -3с ил

8 Пат 2233998 Рос Федерация МПК(7) F 04 D 7/06 Насос для подачи жидкометаллического теплоносителя / Безносов А В, Молодцов А А, Камнев М А, Назаров А В, заявитель и патентообладатель Нижегородский государственный технический университет -№2002125122/06, заявл 19 09 2002, опубл 10 04 2004 Бюл № 9 -3с ил

9 Свидетельство 44414 Рос Федерация МПК(7) G 21 D 9/00 Ядерная энергетическая установка / Безносов А В, Назаров А В, Молодцов А А, Титов А Ю, заявитель и патентообладатель Нижегородский государственный технический университет -№2004131267/22, заявл 25 10 2004, опубл 10 03 2005 Бюл № 7 -3с ил

10 Пат 2284425 Рос Федерация МПК(7) F 04 D 7/06 Насос для перекачки жидкометаллического теплоносителя / Безносов А В , Молодцов А А , Назаров А В , заявитель и патентообладатель Нижегородский государственный технический университет -№2005107847/06, заявл 21 03 2005, опубл 27 09 2006 Бюл № 27 -3с ил

11 Особенности проектирования и эксплуатации циркуляционных насосов экспериментальных стендов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями / Безносов А В , Бокова Т А , Семенов А В , Молодцов А А Тез докл Российская межотраслевая конф Тепломассоперенос и свойства жидких металлов - Обнинск, 2002 - Т 1 -С 207

12 Экспериментальные исследования методов и устройств очистки свинцового теплоносителя и контура реактора типа "БРЕСТ" от примесей / Безносов А В , Бокова Т А , Молодцов А А [и др] Тез докл Вторая научно техническая конференция "Научно инновационное сотрудничество" - М , 2003 - Ч 1 - С 120-121

13 Молодцов, А А К вопросу проектирования и эксплуатации циркуляционных насосов экспериментальных стендов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями / Молодцов А А , Семенов А В · Тез докл Нижегородская сессия молодых ученых, технические науки - Н Новгород, 2003 - С 81

14 Некоторые особенности проектирования и эксплуатации циркуляционных насосов экспериментальных стендов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями / Молодцов А А , Семенов А В , Бокова Т А , Безносов А В Тез докл Девятая международная научно техническая конференция студентов и аспирантов Радиотехника электротехника и энергетика - М , 2003 - С 50

15 Молодцов, А А Испытания макетного образца устройства формирования двухкомпонентного потока жидкость-газ / Молодцов А А , Бокова Т А , Фисейский Н Ф Тез докл Второй региональный научно-технический форум Будущее технической науки Нижегородского региона - Н Новгород, 2003 - С 177

16 Очистка контура и тяжелого теплоносителя от примеси оксидов теплоносителя водородосодержащими газовыми смесями / Безносов А В ,

Бокова Т А , Молодцов А А [и др] Тез докл Шестая международная научная конференция Полярное сияние 2003 - СПб , 2003 -С 202

17 Optimization Of Insulating Coating Formation Technology On The Construction Materials In Heavy Liquid Metal Coolants / Pinaev S S , Muraviev E V , Beznosov A V , Molodsov A A Abstracts 11th International Conference on Fusion Reactor Materials -Japan Kyoto International Conference Hall, 2003.- P 85

18 Опыт эксплуатации центробежных насосов арматуры, других элементов контуров с ТЖМТ (Pb, Pb-Bi, Pb-Li, Ga) / Безносов А В , Серов В Е , Молодцов А А [и др] Тез докл Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях - Обнинск, 2003 -С 24

19 Эксплуатация центробежных насосов арматуры, других элементов контуров с ТЖМТ (Pb, Pb-Bi, Pb-Li, Ga) / Безносов А В , Пинаев С С , Молодцов А А [и др] Тез докл Девятая Нижегородская сессия молодых ученых, технические науки - Н Новгород, 2004 -С 121

20 Влияние примеси кислорода на теплоотдачу к свинцовому теплоносителю / Семенов А В , Молодцов А А , Баранова О. В Тез докл Девятая ежегодная научно-практическая конференция Реакторостроение и атомная энергетика, технологии будущего - Н Новгород 2004 - С 95

21 Экспериментальное исследование влияния контактного взаимодействия поверхностей сталей в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе на их характеристики Безносов А В , Пинаев С С , Молодцов А А [и др] Тез докл Девятая ежегодная научно-практическая конференция Реакторостроение и атомная энергетика, технологии будущего - Н Новгород, 2004 - С 108

22 Экспериментальные исследования влияния примеси кислорода на теплоотдачу к свинцовому теплоносителю / Безносов А В , Баранова О В , Молодцов А А [и др] Тез докл Вторая курчатовская молодежная научная школа - М , 2004 - С 31

23 Исследование влияния механического взаимодействия поверхностей гидродинамических подшипников и зубчатых зацеплений в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе на их характеристики / Безносов А В , Назаров А В , Молодцов А А [и др] Тез докл Вторая курчатовская молодежная научная школа - М , 2004 - С 33

24 Изучение процессов механического изнашивания сталей и методов

защиты от него в условиях тяжелого жидкометаллического теплоносителя / Безносов А В , Назаров А В Молодцов А А [и др] Тез докл Четвертая научно-техническая конференция «Научно инновационное сотрудничество» - М , 2005 - Ч 1 -С 48-49

25 Экспериментальные исследования теплоотдачи к свинцовому теплоносителю при условии изменения окислительного потенциала кислорода / Безносов А В , Семенов А В , Молодцов А А [и др] Тез докл Четвертая научно-техническая конференция «Научно инновационное сотрудничество» - М , 2005 - Ч 1 -С 50-51

26 Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело / Безносов А В , Пинаев С С , Молодцов А А [и др] Тез докл Четвертая научно-техническая конференция «Научно инновационное сотрудничество» - М , 2005 - Ч 1 - С 52-53

27 Очистка свинцового теплоносителя и контура РУ БРЕСТ от оксидов свинца / Безносов А В , Бокова Т А , Молодцов А А [и др] Тез докл Четвертая научно-техническая конференция «Научно инновационное сотрудничество» - М , 2005 - Ч 1 -С 56

28 Исследования межфазного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело / Безносов А В , Пинаев С С , Молодцов А А [и др] Тез докл Российская межотраслевая тематическая конференция «Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах» - Обнинск, 2005 - С 65.

29 Экспериментальное уточнение характеристик теплообмена свинцового теплоносителя при изменении содержания примеси кислорода / Безносов А В , Пинаев С С , Молодцов А А [и др] Тез докл Российская межотраслевая тематическая конференция «Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах» - Обнинск, 2005 - С 66-67

30 Экспериментальные исследования теплоотдачи от свинцового теплоносителя при регулировании содержания в нем примеси кислорода / Безносов А В , Молодцов А А , Семенов А В , Савинов С Ю Тез докл Российская межотраслевая тематическая конференция «Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах» - Обнинск,

2005 - С.68

31 Экспериментальные исследования влияния характеристик свинцового и свинец - висмутового теплоносителей на работоспособность зубчатых зацеплений и гидродинамических подшипников / Безносов А В , Назаров А В , Молодцов А А [и др] Тез докл Российская межотраслевая тематическая конференция «Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах» - Обнинск, 2005 - С 136

32 Изучение характеристик контактного теплообмена свинцового теплоноситель – рабочее тело / Безносов А.В , Молодцов А А , Назаров А В [и др] Тез докл Третья курчатовская молодежная научная школа - М., 2005,- С 20

33 Исследования теплоотдачи от свинцового теплоносителя при регулировании содержания примеси кислорода / Безносов А В , Молодцов А А , Семенов А В [и др] Тез докл Третья курчатовская молодежная научная школа - М , 2005,- С 23

34 Исследования работоспособности гидродинамических подшипников и зубчатых зацеплений в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе / Безносов А В , Молодцов А А , Назаров А В [и др] Тез докл Третья курчатовская молодежная научная школа - М , 2005,- С 25

35 Экспериментальные исследования теплоотдачи к свинец - литиевому теплоносителю / Безносов А В . Семенов А В , Молодцов А А [и др] Тез докл Третья курчатовская молодежная научная школа - М , 2005,- С 29

36 Экспериментальные исследования теплообмена и гидравлического сопротивления свинец-висмутового теплоносителя в поперечном магнитном поле при контроле и регулировании примеси кислорода / Безносов А В , Кудрин О О., Молодцов А А [и др.] Тез докл Четвертая курчатовская молодежная научная школа - М , 2006,- С 40

37. Исследования характеристик теплоотдачи от свинцового теплоносителя при регулировании содержания примеси кислорода / Безносов А В , Кудрин О О , Молодцов А А [и др] Тез докл Четвертая курчатовская молодежная научная школа - М , 2006,- С 31

38 Исследования двухкомпонентного потока на объемной и плоской моделях участков активной зоны реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 отчет о

НИР (промежуток) / Нижегородский государственный технический университет, рук Безносков А В - Н Новгород, 2001 -119 с - Исполн Давыдов Д В, Серов В Е, Бокова Т.А., Молодцов А А, Ляхова П И - №ГР 01 20 00 13554 - инв № 0200107953

39 Разработка и проведение стидовых испытаний макетного образца устройства формирования направленного двухкомпонентного потока для РУ БРЕСТ-ОД-300 отчет о НИР (промежуток) / Нижегородский государственный технический университет, рук Безносков А В - Н Новгород, 2002 -110 с - Исполн Бокова Т.А., Фисейский Н Е, Молодцов А А, Данилова И В - №ГР 01 20 00 13554 - инв № 0200207475

40 Исследование характеристик потока в моделях реакторного контура РУ БРЕСТ-ОД-300 отчет о НИР (промежуток) / Нижегородский государственный технический университет, рук. Безносков А В - Н Новгород, 2005 -121 с - Исполн Бокова Т А, Мелузов А Г, Семенов А В, Молодцов А А, Назаров А В №ГР 01 20 00 13554 -инв.№ 0200507578

41 Комплексные исследования теплоотвода от свинцового теплоносителя для верификации рабочих методик (продольное обтекание круглой трубы) отчет о НИР (промежуток) / Нижегородский государственный технический университет, рук Безносков А В - Н Новгород, 2007 -128 с - Исполн Молодцов А А, Назаров А В, Бокова Т А, Савинов С Ю, Кудрин О О, Ляхов И Ю - №ГР 01 2 006 08891 -инв № 0200707998

42 Комплексные исследования теплоотвода от свинцового теплоносителя для верификации рабочих методик (продольное обтекание горизонтальной круглой трубы) отчет о НИР (заключ) / Нижегородский государственный технический университет, рук Безносков А В - Н Новгород, 2007 -168 с - Исполн Молодцов А А, Назаров А В, Бокова Т.А., Новожилова О О, Савинов С Ю, Кудрин О О, Ляхов И Ю - №ГР 01 2 006 08891 -инв № 0200708668

Подписано к печати 27 04 2007 Формат 60 x 90^{1/16} Бумага офсетная №1

Уч -изд л 1,0 Тираж 100 экз Заказ №51

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950 Н Новгород, ул Ульянова, 46