**Махов Кирилл Андреевич. Исследование структуры и триботехнических характеристик пристенного слоя в потоке ТЖМТ применительно к элементам контуров с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: диссертация ... кандидата технических наук: 05.04.11 / Махов Кирилл Андреевич;[Место защиты: Акционерное общество "Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения имени И.И. Африкантова"].- Нижний, 2016.- 164 с.**

**НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

На правах рукописи

**Махов Кирилл Андреевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ**

**ХАРАКТЕРИСТИК ПРИСТЕННОГО СЛОЯ В ПОТОКЕ ТЖМТ**

**ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭЛЕМЕНТАМ КОНТУРОВ С РЕАКТОРАМИ НА**

**БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ТЖМТ**

05.04.11 – Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

Безносов А.В.

г. Нижний Новгород 2015 г.

2 СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение…………………………………………………………… 6

Глава 1. Аналитический обзор. Структура пристенного слоя и  
массообменные процессы в пристенном слое при различных  
эксплуатационных характеристиках контуров с  
ТЖМТ………………..……… 14

1. Структура пристенного слоя при различных эксплуатационных состояниях………………………………………………………………… 14
2. Влияние состояния пристенной области на гидродинамические характеристики потока ТЖМТ………………………………………….. 28

1.3 Влияние состояния пристенной области на характеристики  
теплообмена в контурах с ТЖМТ…………………………………………. 32

1.4 Влияние состояния пристенной области на характеристики трения  
и износа контактирующих поверхностей в среде  
ТЖМТ……………………………………………………………………. 33

Глава 2. Исследование характеристик пристенной области «ТЖМТ-  
конструкционный материал» методом «экспресс-замораживания» 36

1. Общие положения…………………….…………………..… 36
2. Цель исследования………………………………..………..……… 38
3. Описание экспериментальных стендов………………..………… 38
4. Описание экспериментального стенда ФТ-ПО со свинцовым теплоносителем……… 38
5. Описание экспериментального стенда ФТ-3 со свинцовым теплоносителем ….………………………… 39
6. Описание экспериментального стенда ФТ-1 со свинец-висмутовым теплоносителем………… 43

2.4 Описание экспериментального участка………………………… 47

3

1. Программа проведения эксперимента……………………..…….. 49
2. Методика обработки экспериментальных данных……………… 26
3. Обсуждение результатов экспериментов………………………… 57
4. Анализ состояния поверхностей образцов……………… 57
5. Исследования шлифов продольных разрезов образцов после экспресс замораживания…………………………. 66
6. Методика проведения исследований…………. 66
7. Обсуждение результатов исследований……… 66
8. Состояние и состав примесей…………………………………… 77
9. Исследование микротвердости пристенной области…………… 78
10. Общие положения…………………………………….…… 78
11. Методика определения микротвердости структур 79 пристенной области………………………………….……
12. Обсуждение результатов исследования………………… 80

2.10 Выводы по главе 2………………………………………………… 82  
Глава 3. Исследование изменения триботехнических характеристик

(шероховатости) каналов реакторных контуров, изменяющих их

гидравлическое сопротивление в процессе эксплуатации………………… 87

1. Общие положения……………………………………………………… 87
2. Цель исследования…………………………………………………… 88
3. Методика проведения исследований шероховатости……………… 89
4. Обсуждение результатов исследований……………………………… 100

3.4.1 Влияние времени циркуляции свинца на изменение 100  
шероховатости контактных поверхностей……………………………

3.4.2 исследование влияния режимных параметров контура на  
скорость изменения состояния контактирующих поверхностей с  
ТЖМТ поверхностей…………………………………………………… 102

3.4.2.1 Влияние времени циркуляции эвтектики свинце-висмут на изменение параметров шероховатости контактирующих

4

поверхностей………………………………………………………… 103

3.4.2.2 Влияние температуры эвтектики свинец-висмут на  
изменение параметров шероховатости контактирующих  
поверхностей……………………………………………………….. 107

1. Влияние средней скорости потока эвтектики свинец-висмут на изменение параметров шероховатости контактирующих поверхностей………………………………….. 110
2. Влияние термодинамической активности кислорода в свинец-висмутовом теплоносителе на изменение параметров шероховатости контактирующих поверхностей………………… 112

3.4.2.5 Влияние объема циркулирующего теплоносителя свинец-  
висмут на скорость изменения шероховатости контактных  
поверхностей ……………………………………………………… 113

3.5 Оценка повторяемости данных по изменению параметров Ra и Rz  
шероховатости контактирующих со свинцом-висмутом  
поверхностей………………………………………………………………. 114

3.6 Влияние состояния пристенной области на гидродинамические  
характеристики потока ТЖМТ…………………………………………… 116

3.7 Выводы по главе 3……………………………………………………… 118  
Глава 4. Экспериментальное исследование влияния состояния

пристенной области на характеристики трения в кольцевых зазорах при продольном перемещении модели оболочки нейтронно-поглощающего

элемента СУЗ относительно его чехла………………………………………… 122

1. Общие положения……………………………………………………… 122
2. Цели и задачи исследования………………………………………… 126
3. Описание экспериментального стенда……………………………… 127
4. Описание экспериментального участка……………………………… 133

4.5 Система определения усилий, возникающих в технологическом  
канале «оболочка ПЭЛ – чехол» экспериментального

5

участка……………………………………………………………………… 135

1. Методика проведения эксперимента………………………………… 139
2. Методика обработки экспериментальных данных ………………… 141
3. Обсуждение результатов исследований……………………………… 143

4.8.1 Состояние контактных поверхностей до экспериментальных  
исследований………………………………………………………… 143

4.8.2 Состояние контактных поверхностей после  
экспериментальных исследований………………………………… 144

4.8.3 Анализ изменения усилий, возникающих при движении

имитатора стержня поглотителя нейтронов в кольцевом зазоре в

потоке ТЖМТ…………………………………….……………………

149

4.9 Выводы по главе 4……………………………………………………… 153  
Заключение………………………………………………………………… 155  
П еречень сокращений, условных обозначений…………………………. 158  
Список использованных источников…………………………………….. 159  
П риложение А Дипломы победителя на международной и  
отечественной конференциях за работы автора по теме  
диссертации…………………… 163

6

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития мировой гражданской атомной

энергетики является освоение технологий ядерных энергетических установок на быстрых нейтронах 4-го поколения. Основными отличительными особенностями по сравнению с действующими реакторными установками является возможность воспроизводства ядерного топлива и существенное увеличение КПД энергоблоков.

В настоящее время в мире ведутся работы по проектированию ядерных энергетических установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями: свинец (БРЕСТ-ОД-300, LFR) и свинец-висмут (СВБР-100, MYRRHA). Советский Союз является единственной в мире страной, освоившей свинцово-висмутовый теплоноситель применительно к ядерным энергетическим установкам, реализованных в проектах атомных подводных лодок проектов 645, 705, 705К.

При создании в сжатые сроки отечественных транспортных реакторных  
установок практически не уделялось внимание вопросам состояния пристенной  
области контакта ТЖМТ с поверхностями конструкционных материалов,  
изменение которой, вызванное различными механизмами образования и  
массопереноса частиц примесей твердой фазы при длительной эксплуатации  
контуров с ТЖМТ приводит к изменению коррозионо-эрозионных,

теплогидравлических, триботехнических и других эксплуатационных

характеристик элементов контуров с этими теплоносителями. Создание оборудования РУ АПЛ иногда производилось исходя из оценочных расчетов по методикам, разработанным для других сред с последующей доработкой этих конструкций до требований технических заданий, путем проведения испытаний натурных узлов в среде ТЖМТ. Такой подход не мог учитывать физико-химические особенности эвтектики свинец-висмут и влияние этих особенностей на работоспособность оборудования при длительной эксплуатации.

7

Возродившийся в начале 21-го века интерес к энергетическим установкам с теплоносителями свинец и свинец-висмут привел к необходимости создания научно обоснованных расчетных методик элементов ЯЭУ с учетом отличий свойств ТЖМТ от традиционных теплоносителей (вода, натрий) для обеспечения длительной эксплуатации оборудования реакторных контуров с этими теплоносителями в соответствии с техническим заданием.

**Актуальность темы работы**

Одним из основных факторов, влияющих на ресурс узлов в среде ТЖМТ, теплогидравлические и другие эксплуатационные характеристики является состояние пристенной области – области контакта ТЖМТ с поверхностями сталей. Изменение состояния частиц примесей на поверхности конструкционных материалов и в пристенном слое со временем изменяет шероховатость контактирующих поверхностей, что приводит к изменению гидравлического сопротивления трасс с ТЖМТ. Этот эффект особенно существенно важен в контурах при естественной циркуляции теплоносителя за счет статического перепада высот (РУ БРЕСТ).

Изменение состояния пристенной области приводит к изменению  
теплообменных характеристик контура, характеристик трения и износа

контактирующих поверхностей в среде ТЖМТ (подшипниковые узлы ГЦН, оболочки стержней поглощающих элементов системы управления и защиты реактора и т.д.), коррозионно-эрозионных и других процессов.

Отсутствие объективной информации о влиянии режимных параметров контура на состояние и изменение характеристик пристенной области при циркуляции ТЖМТ не позволяет объективно прогнозировать изменение состояния, ресурс и другие эксплуатационные характеристики контуров с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями.

**Целью диссертационной работы** являлось исследование структур и характеристик пристенного слоя в среде ТЖМТ, а также в влияния режимных параметров контура (скорость обтекания контактных поверхностей потоком

8

ТЖМТ, термодинамическая активность кислорода, температура теплоносителя, время циркуляции) на изменение его эксплуатационных характеристик -шероховатости поверхностей конструкционного материала при длительном контакте с потоком высокотемпературного ТЖМТ (свинец, свинец-висмут) и изменения характеристик трения и износа оболочки поглощающего элемента системы управления и защиты ядерного реактора при продольном возвратно-поступательном перемещении стержня относительно чехла при циркуляции свинцового теплоносителя в образуемом парой трения кольцевом зазоре с изменением состояния пристенной области.

**Задачи работы**

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

- проведение анализа накопленного в исследуемой области  
информационного материала;

- анализ источников формирования образований примесей в пристенной  
области при длительной эксплуатации контуров с ТЖМТ;

- анализ влияния характеристик пристенной области на  
гидродинамические, теплообменные характеристики контуров с ТЖМТ и  
характеристики трения и износа контактирующих в среде ТЖМТ поверхностей;

* проектирование и создание высокотемпературных стендов с ТЖМТ с температурами до 5500С и расходом теплоносителя в экспериментальных участках до 20 т/час;
* разработка методик объективного контроля и исследования состояния пристенного слоя в потоке ТЖМТ;

- определение структур и характеристик пристенного слоя (толщина,  
состав, состояние и др.) при различных режимах работы контуров с ТЖМТ;

- экспериментальное определение влияния режимных параметров контура  
на скорость изменения шероховатости поверхностей конструкционных  
материалов;

9

- создание исследовательского стенда и экспериментального участка  
«имитатор стержня ПЭЛ – чехол» с системой оперативного контроля изменения  
силы трения в экспериментальном канале;

- проведение экспериментальных исследований по определению динамики  
изменения силы трения в системе «имитатор стержня ПЭЛ – чехол» при  
изменении состояния пристенной области.

**Научная новизна работы** заключается в представительном, объективном установлении структур пристенной области в среде ТЖМТ, разработке методики «экспресс **-** замораживания» для объективной фиксации состояния пристенной области в потоке ТЖМТ. Впервые проведены комплексные исследования для определения факторов, влияющих на практически важное изменение шероховатости поверхностей в среде ТЖМТ, вызванной изменением состояния пристенной области в результате длительной циркуляции высокотемпературных свинца и свинца**-**висмута при средних скоростях потока от 0,5 до 2 м/с,

5

диапазоне Re=2,7\*104-1,1\*10 , температурах от 350 до 5500С,

термодинамической активности кислорода от 5\*10-4 до 100. Экспериментально было показано изменение характеристик трения и износа контактирующих в ТЖМТ поверхностях в системе «имитатор стержня ПЭЛ – чехол» при изменении состояния пристенной области.

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается

использованием натурных теплоносителей свинец и свинец-висмут при  
реакторных условиях (температура, скорости, содержание кислорода) и  
использовании сертифицированных средств контроля и измерения режимных  
параметров контуров, сертифицированного программного обеспечения при  
проведении экспериментов, соответствием полученных результатов

общепринятым физическим представлениям.

**Практическая значимость работы**

Результаты работы позволили установить структуры, формирующие пристенную область, влияние режимных параметров контуров с ТЖМТ (температура теплоносителя, термодинамическая активность кислорода,

10

скорость обтекания контактирующих поверхностей, время циркуляции) на  
изменение характеристик пристенной области контакта тяжелых

жидкометаллических теплоносителей с поверхностями конструкционных  
материалов, а, также, показали, что изменение пристенной области в результате  
циркуляции ТЖМТ приводит к изменению характеристик износа

контактирующих поверхностей на примере системы «имитатор оболочки стержня поглощающего элемента СУЗ – чехол». Исследовано изменение шероховатости стенок контуров с ТЖМТ, что особенно важно для РУ типа БРЕСТ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

* созданные экспериментальные установки (стенды) с натурными ТЖМТ, методики и результаты исследования характеристик пристенной области применительно к условиям реакторных установок с ТЖМТ;
* методика объективного контроля состояния пристенной области в потоке ТЖМТ при реализации различных режимных параметров контура «экспресс-замораживанием» потока ТЖМТ;
* результаты исследования структур, формирующих пристенную область и их характеристик в потоке ТЖМТ;

- комплекс экспериментальных исследований, подтверждающих  
несмачивание оксидированных поверхностей сталей свинцовым и свинцово-  
висмутовым теплоносителями в условиях реакторных контуров;

**-** массив экспериментальных данных о факторах, определяющих  
изменение шероховатости поверхностей и динамике изменения параметров Ra и  
Rz при изменении времени циркуляции теплоносителя, термодинамической  
активности кислорода, скорости обтекания контактирующих поверхностей,  
температуры теплоносителя;

**-** экспериментальное подтверждение влияния состояния пристенной  
области на характеристики трения и износа элементов пары трения «имитатор  
стержня поглотителя – чехол» системы управления и защиты реактора.

11

**Личный вклад автора**

Исследования, результаты которых приводятся в настоящей работе  
проводились на оборудовании и экспериментальных установках,

смонтированных на базе кафедры «АТС» НГТУ им. Р.Е. Алексеева при непосредственном участии автора, автором лично или под его руководством. Автор принимал участие на всех этапах подготовки, проектирования, монтажа, отладки экспериментальных участков, оборудования, а также в разработке программ-методик, проведении исследований, обработки и обсуждении результатов. Подготовка диссертационной работы осуществлялась под научным руководством доктора технических наук, профессора Безносова Александра Викторовича.

В работе обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований,

выполненных на кафедре «АТС» НГТУ им. Р.Е. Алексеева автором самостоятельно и в соавторстве с д.т.н., проф. Безносовым А.В., инж. Серовым В.Е., доц. Боковой Т.А., асп. Шумилковым А.И., асп. Ярмоновым М.В., асп. Чернышем А.С. (НГТУ).

**Апробация работы и публикации**

Результаты работы докладывались на международных и отечественных  
конференциях и семинарах: 19th International Conference On Nuclear Engineering  
(ICONE19, Япония, Осака, 2011г.); 22nd International Conference On Nuclear  
Engineering (ICONE22, Чехия, Прага, 2014г.); 12th International Workshop On  
Spallation Material Technology (IWSMT-12, Австрия, Брегенц, 2014г.); «7-я  
Курчатовская молодежно-научная школа» (Москва 2009г.); Всероссийская

научная школа для молодежи «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Обнинск 2009г.); Молодежная научно-техническая конференция «Эксперимент 2010» (Нижний Новгород 2010г.); 10-я Международная молодежная научно – техническая конференция «Будущее технической науки» (Нижний Новгород, 2010г.); Всероссийская научная школа для молодежи «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Обнинск 2010г.); Межотраслевой семинар «Тяжелые

12

жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» (Обнинск, 2010г.);  
«8-я Курчатовская молодежно-научная школа» (Москва, 2010г.); 11-я  
Международная молодежная научно – техническая конференция «Будущее  
технической науки» (Нижний Новгород , 2011г.); «9-я Курчатовская молодежно-  
научная школа» (Москва, 2011г.); 11-я Международная конференция  
"Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и  
эксплуатации оборудования АЭС" (Пушкин, 2011г.); 12-я Международная  
молодежная научно – техническая конференция «Будущее технической науки»  
(Нижний Новгород, 2012г.); «10-я Курчатовская молодежно-научная школа»  
(Москва 2012г.); 13-я Международная молодежная научно – техническая  
конференция «Будущее технической науки» (Нижний Новгород, 2013г.); «11-я  
Курчатовская молодежно-научная школа» (Москва 2013г.); 14-я Международная  
молодежная научно – техническая конференция «Будущее технической науки»  
(Нижний Новгород, 2014г.); «12-я Курчатовская молодежно-научная школа»  
(Москва 2014г.); 14-я Международная молодежная научно – техническая  
конференция «Будущее технической науки» (Нижний Новгород, 2014г.);

Результаты исследований, выполненных автором лично или при его непосредственном участии, опубликованы в статьях в журнале «Атомная энергия» (2), в журнале «Ядерная энергетика» (3), в журнале «Вестник машиностроения» (1), в журнале «Известия самарского научного центра российской академии наук» (1). Получено 5 патентов на полезную модель.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору А.В. Безносову осуществлявшему научное руководство этой работой и предоставившему автору все условия для научной деятельности, коллективу кафедры «АТС» НГТУ за помощь в работе и заведующему кафедрой д.т.н., профессору Дмитриеву С.М. за поддержку в работе.

**Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Объем работы составляет 164 страницы, 75 рисунков, 7 таблиц, список использованных источников из 30 наименований, в том числе 8 работ автора.

13

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации,

формулируется научная новизна и практическая значимость работы, цели задачи исследования.

**В первой главе** анализируются процессы, определяющие состояние пристенной области при длительном контакте ТЖМТ с поверхностями конструкционных материалов, процессы массообмена между структурами пристенной области. Проводится теоретический анализ влияния состояния пристенной области на гидродинамические, теплообменные характеристики контуров с ТЖМТ и характеристики трения и износа контактирующих поверхностей и другие характеристикиреакторных контуров с ТЖМТ.

**Во второй главе** приводится описание экспериментальных установок для проведения исследований по определению структур, формирующих пристенную область, созданных лично автором лично под его руководством и при его непосредственном участии. Представлены результаты химического анализа и экспериментального определения микротвердости структур пристенной области в потоке ТЖМТ.

**В третьей главе** представлены экспериментальные результаты по установлению влияния режимных параметров контура (времени циркуляции ТЖМТ, термодинамической активности кислорода, скорости обтекания поверхностей экспериментальных участков, температуры теплоносителя) на скорость изменения шероховатости поверхности конструкционной стали, контактирующей с ТЖМТ.

**В четвертой главе** приводится описание экспериментальной установки для определения влияния состояния пристенной области на характеристики трения и износа контактирующих поверхностей системы «имитатор стержня поглотителя нейтронов – чехол» системы управления и защиты реактора и результаты экспериментальных исследований изменения состояния контактных поверхностей и усилий, возникающих при движении стержня поглотителя нейтронов в кольцевом зазоре в потоке ТЖМТ.

**Заключение**

Основные результаты и выводы диссертационной работы

применительно к контурам инновационных реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ включают следующее:

1. Проведен анализ накопленного в исследуемой области  
информационного материала.

2. Проведен анализ источников формирования образований примесей в  
пристенной области при длительной эксплуатации контуров с ТЖМТ.

3. Проведен анализ влияния характеристик пристенной области на  
гидродинамические, теплообменные характеристики контуров с ТЖМТ и  
характеристики трения и износа контактирующих в среде с ТЖМТ  
поверхностей.

4. Спроектированы и созданы высокотемпературные стенды с ТЖМТ с  
температурами до 5500С и расходом теплоносителя в экспериментальных  
участках до 20т/час.

1. Разработаны экспериментальные методики объективного исследования и контроля состояния пристенной области в потоке ТЖМТ при реализации различных режимных параметров контура «экспресс-замораживанием» потока ТЖМТ. Определены основные характеристики пристенного слоя (толщина, состав, состояние и др.) при различных режимах работы контуров с ТЖМТ.
2. Экспериментально определены структуры, формирующие пристенную область. Установлено, что пристенная область представляет собой многокомпонентную структуру, в состав которой входят оксидное покрытие на поверхностях сталей, сцепленые с оксидным покрытием отложения частиц примесей твердой фазы, газовая (парогазовая) прослойка, слой частиц примесей в пограничном турбулентном слое, пропитанных теплоносителем, свободно перемещающимся с теплоностелем. Пристенный слой в контурах с ТЖМТ представляет собой дисперсную систему, в которой дисперсной средой является теплоноситель, содержащий дисперсную

156

твердую фазу частиц примесей и газовую (парогазовую) фазу, ограниченных от дисперсной среды поверхностью раздела.

7. Экспериментально установлено возрастание шероховатости  
измеряемых параметров Rz и Ra поверхностей конструкционных материалов,  
вызванных изменением состояния пристенной области в результате  
циркуляции ТЖМТ при различных режимных параметрах.  
Экспериментально определено, что шероховатость контактирующих с  
ТЖМТ поверхностями увеличивается с увеличением времени циркуляции  
теплоносителя (по логарифмическому закону при времени циркуляции до  
100 часов в условиях экспериментов), расхода теплоносителя через  
экспериментальный участок (по экспоненциальному закону в диапазоне  
скоростей обтекания поверхностей конструкционных материалов от 0,5 до  
1,4 м/с), температуры теплоносителя, термодинамической активности  
кислорода.

8. Создан исследовательский стенд и экспериментальный участок  
«имитатор стрежня ПЭЛ – чехол» с системой оперативного контроля  
изменения силы трения в экспериментальном канале.

9. Приведены экспериментальные исследования по определению  
динамики изменения силы трения в системе «имитатор стержня ПЭЛ –  
чехол» при изменении состояния пристенной области. В условиях  
проводимого эксперимента по отработке методики исследований  
характеристик трения и износа пары трения «оболочка стержня  
поглощающего элемента – чехол» происходило увеличение возникающей  
при контакте поверхностей силы трения с 0,6Н до 1,52Н при перемещении  
стержня из верхнего положения в нижнее, от 1,96Н до 2,72Н при  
перемещении стержня из нижнего положения в верхнее после 800 циклов  
возвратно-поступательного движения при скорости перемещения стержня  
относительно оболочки – 4м/с и скорости теплоносителя в кольцевом зазоре  
– 1,1м/с, вызванное изменением состояния поверхностей вследствие

157

абразивного износа твердыми частицами примесей в пристенной области с разрушением оксидных покрытий в зоне износа.