

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.039

На правах рукописи

Бутов Алексей Александрович

РГБ ОД

7 - 457 2009

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ГАЛЛИЕВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ
ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА

05.04.11 «Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология
материалов атомной промышленности»

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Безносков А.В.

Н. Новгород 2000 г.

Работа выполнена на кафедре "Атомные электростанции и установки"
Нижегородского государственного технического университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Безносков А.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Орлов Ю.И.

кандидат технических наук,
Севастьянов В.П.

Ведущая организация - РИЦ "Курчатовский институт",
г. Москва.

Защита состоится 30 мая 2000 г. в 10 часов на заседании регионального
диссертационного совета Д 063.85.04 Нижегородского государственного
технического университета по адресу: 603600, г. Нижний Новгород, ул.
Минина, д.24, корп. 5, ауд.5232.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского
государственного технического университета.

Автореферат разослан "28" апреля 2000 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор  Дмитриев С.М.

В333.45,03

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Дальнейшее развитие мирового энергопроизводства по оценкам специалистов будет сопровождаться существенным изменением сложившейся топливно-энергетической структуры. Это обуславливается, в первую очередь, существенным повышением доли ядерной энергетики в мировом энергопроизводстве.

Однако, запасы ядерного топлива в природе весьма ограничены. По оценкам специалистов, запасы природного урана смогут обеспечить растущие потребности населения планеты в энергоресурсах лишь на ближайшие 200 – 300 лет, в связи с чем возникает необходимость поиска новых перспективных источников энергии.

В качестве одного из возможных вариантов решения данной проблемы специалисты рассматривают использование термоядерных реакторов (ТЯР), способных в полной мере удовлетворить требования, предъявляемые к энергоисточникам:

- перспективность (топливные запасы для ТЯР способны удовлетворять потребности планеты на практически неограниченный срок);
- надежность и безопасность работы (существенно меньшее по сравнению с реакторами деления количество образующихся в процессе работы радиоактивных отходов, особенно с большим периодом полураспада);
- отсутствие крупномасштабных горных разработок, транспортировки топлива и загрязнения окружающей среды;
- внутренне присущая ядерная безопасность (исключает проблему их размещения вблизи населенных пунктов).

Однако, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в данном направлении, существует ряд проблем, не решенных к настоящему времени и

требующих дальнейших исследований. К ним, в частности, относится проблема охлаждения и защиты дивертора ТЯР, который является одним из наиболее энергонапряженных элементов конструкции (тепловой и корпускулярный поток на приспые пластины составляет порядка нескольких МВт на квадратный метр). В связи с этим идея охлаждения дивертора с использованием жидкометаллического теплоносителя (ЖМТ) является практически единственным возможным безальтернативным решением.

К обычным проблемам, возникающим при использовании ЖМ, в ТЯР добавляется новая проблема уменьшения до приемлемых значений МГД – сопротивления при прокачке ЖМ теплоносителя в сильном поперечном магнитном поле, в том числе и при термоударах, вызываемых дискретным выделением энергии в токамаке. Без решения этих проблем невозможно создание надежно работающего контура охлаждения дивертора жидкометаллическим теплоносителем.

В качестве одного из наиболее перспективных теплоносителей для использования в системе охлаждения дивертора ТЯР специалистами РИЦ КИ был предложен галлий.

Цель работы

Целью настоящей работы является теоретическая разработка и экспериментальные исследования механизмов формирования и доформирования электроизолирующих покрытий (ЭИП) на поверхностях конструкционных материалов, рассматриваемых для использования в условиях галлиевого контура системы охлаждения дивертора ТЯР при контакте с галлием, исследования их работоспособности, а также определения МГД – сопротивления потоку галлия в поперечном магнитном поле в условиях рабочих температур и скоростей потока в поперечном магнитном поле индукцией до 1 Тл.

Для реализации указанной цели потребовалось решить следующие основные задачи:

- Теоретический анализ процессов массопереноса примеси кислорода в галлиевом контуре системы охлаждения дивертора ТЯР;

- Исследование возможных способов формирования и доформирования покрытий применительно к условиям работы галлиевого контура охлаждения дивертора ТЯР;

- Экспериментальное исследование характеристик ЭИП на стали и ванадиевом сплаве в галлии;

- Исследование влияния на величину $\rho\delta$ (ρ - удельное сопротивление материала покрытия, δ - его толщина) термоциклических нагрузок, реализуемых в условиях токамака;

- Экспериментальное определение коэффициента сопротивления λ при тчении галлиевого теплоносителя в поперечном магнитном поле и его зависимости от температуры, величины индукции магнитного поля и технологии формирования ЭИП.

- Экспериментальные исследования по определению возможности контроля термодинамической активности кислорода в галлиевом теплоносителе методом гальванического концентрационного элемента.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- Результаты теоретических исследований процессов массопереноса примеси кислорода в контуре системы охлаждения дивертора ТЯР;

- Результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выбор и обоснование способов формирования оксидных ЭИП, обеспечивающих возможность создания жидкометаллической системы охлаждения дивертора ТЯР на основе галлиевого теплоносителя;

- Результаты теоретических и экспериментальных работ по исследованию характеристик ЭИП;

- Результаты теоретических и экспериментальных работ по расчету максимальных термоударов в ЭИП и исследованию характеристик ЭИП, при термоциклических нагрузках;

- Результаты экспериментального определения МГД - сопротивления при течении галлиевого теплоносителя в каналах из стали и ванадия в поперечном магнитном поле индукцией до 1,0 Тл, при скоростях потока галлия до 2,05 м/с в диапазоне температур 100...300°С;

- Результаты исследований по определению возможности контроля термодинамически активного кислорода в галлиевом теплоносителе методом гальванического концентрационного элемента.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в выполненных расчетно – теоретических и экспериментальных исследованиях механизмов формирования оксидных ЭИП на поверхностях конструкционных материалов, рассматриваемых для использования в условиях галлиевого контура системы охлаждения дивертора ТЯР при контакте с ЖМТ на основе галлия, исследованию их работоспособности, а также определению МГД – сопротивления потоку галлия в магнитном поле.

Личный вклад автора

Все расчетно-теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых приведены в настоящей работе, выполнены непосредственно автором или при его участии под руководством научного руководителя д.т.н. профессора Безносова А. В.

Практическая полезность работы

Результаты работы используются для обоснования концепции применения систем охлаждения дивертора ТЯР галлиевым теплоносителем.

Апробация работы

Работа прошла апробацию на совещаниях специалистов, на национальных и международных конференциях в г. Обнинске (1996 – 1999 г.).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в двух авторских свидетельствах на полезную модель, трех научно – технических отчетах, шести докладах на научных конференциях, двух статьях в журнале "Вопросы атомной науки и техники" и статье в журнале "Ядерная энергетика".

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и приложений. Объем работы составляет 191 текстовые страницы, 63 рисунка, 20 таблиц, список литературы из 38 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, место разрабатываемой научной темы в круге вопросов, возникающих при разработке термоядерного реактора.

В первой главе рассматривается возможность применения галлиевого теплоносителя в системе охлаждения дивертора токамака, рассматривается проблема совместимости теплоносителя с конструкционными материалами системы охлаждения дивертора токамака и описываются его основные физические и химические свойства.

Одним из перспективных теплоносителей к использованию в качестве ЖМТ для охлаждения дивертора ТЯР является галлий. Галлий принадлежит к самым легкоплавким металлам (температура плавления - около 300 К), уступая только ртути и цезию. Температура кипения его (приблизительно 2500 К) выше, чем у других легкоплавких металлов, вследствие чего температурный интервал

существования жидкой фазы очень широк. Плотность расплавленного галлия больше, чем у твердого металла. Галлий очень склонен к переохлаждению. Будучи расплавлен и вновь охлажден, он может длительное время (до нескольких месяцев) сохраняться в жидком состоянии при комнатной температуре.

Вышеперечисленные свойства галлия дают основание рассматривать его в качестве перспективного теплоносителя для использования в системе охлаждения дивертора ТЯР.

Во второй главе производится предварительный анализ возможных технологий формирования ЭИП, анализ процессов массообмена примеси кислорода в районе поверхности конструкционного материала, контактирующей с галлиевым теплоносителем.

Для успешной эксплуатации контура охлаждения дивертора с галлиевым теплоносителем необходим процесс формирования и доформирования оксидных ЭИП, в связи с чем возникает необходимость в разработке технологий периодической кислородной обработки контура и его элементов с целью формирования ЭИП на внутренних поверхностях трубопроводов и дальнейшего поддержания их в рабочем состоянии. Автором анализировались следующие основные технологии кислородной обработки галлиевого контура:

- введение кислорода в составе газовых смесей в газовый объем над свободной поверхностью жидкого галлия;
- введение кислорода в составе газовых смесей непосредственно в поток галлия;
- введение оксидов галлия либо оксидов других металлов, неактивных по отношению к теплоносителю и конструкционным материалам контура в поток ЖМТ.

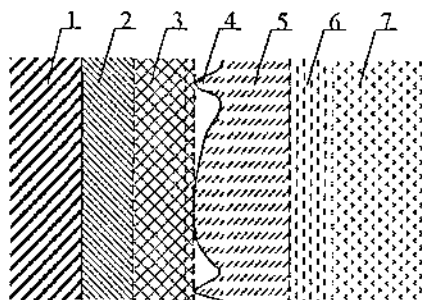
В процессе изготовления, технологических обработок и эксплуатации ЖМТ – контура на поверхностях, контактирующих с теплоносителем,

формируются слои, качественно отличающиеся от конструкционного материала как по химическому составу, так и по физическим свойствам.

Автором предлагается общий случай модели пристенной области (рис.1). Непосредственно на материале (1) в процессе его изготовления формируется слой (2) толщиной от долей микрона до десятков микрон. Химический состав слоя по толщине переменен: в его состав входят чистые компоненты конструкционных материалов и их оксиды.

В процессе работы материала в составе ЖМТ – контура внешняя граница слоя (2) переходит в слой отложений (3), состоящий из оксидов компонентов конструкционного материала и теплоносителя с добавлением перенесенных теплоносителем масс примесей. Механические свойства этих слоев (2, 3) несколько отличаются друг от друга: так, например, значения микротвердости в направлении от материала (1) к поверхности уменьшаются в каждом слое приблизительно в 1,5 – 2,5 раза. В общем случае отложения в слое (3) могут адсорбировать на себя газовую фазу (4) из теплоносителя.

Поверхность отложений (3) со стороны теплоносителя обогащена примесями, которые образуют рыхлый, пропитанный теплоносителем слой (5) смеси дисперсных частиц примесей. Этот слой контактирует с поверхностью (6) обогащенной дисперсной фазой и растворенными примесями диффузионного слоя ламинарного подслоя, между которым и ядром потока (7) также происходит массообмен примесями.



- 1 – Материал
- 2 – Оксидная пленка
- 3 – Слой отложений
- 4 – Газовая прослойка
- 5 – Слой дисперсных отложений
- 6 – Ламинарный подслой
- 7 – Ядро потока

Рис.1. Модель пристенной области

Процессы формирования отложений определяются в первую очередь:

- диффузией примесей компонент конструкционных материалов через указанные выше слои;
- диффузией принесенных потоком масс примесей к стенке;
- физико-химическим взаимодействием примесей между собой и с теплоносителем в указанных слоях.

Анализ массообмена примеси кислорода на поверхности конструкционного материала, контактирующей с галлиевым теплоносителем показал, что в общем случае массообмен примесей на границе контакта конструкционный материал – теплоноситель осуществляется через 6 слоев, имеющих различную структуру и физико – химические свойства. Процессы массообмена на локальном участке определяются физико – химическим составом примесей, маркой конструкционного материала, температурой, режимом течения теплоносителя и др.

В третьей главе приведены результаты исследований МГД-сопротивления потока галлиевого теплоносителя в поперечном магнитном поле.

Исследования проводились в циркуляционном контуре на круглых трубах, изготовленных из стали 08X18H10T и ванадиевого сплава ВТХ – 1 (4% - Cr, 4% - Ti, до 1% - примеси, остальное – ванадий) с электроизолирующими покрытиями (ЭИП) в состоянии поставки, а также сформированными в условиях контура с использованием технологий, предложенных в главе 2 диссертации. Внутренний диаметр стальной трубы – $6 \cdot 10^{-3}$ м, трубы, изготовленной из ванадиевого сплава – $1,4 \cdot 10^{-2}$ м. Для сравнения были также проведены эксперименты на трубе, изготовленной из изолятора (молибденового стекла) внутренним диаметром $6 \cdot 10^{-3}$ м. В процессе формирования ЭИП проводилось измерение характеристики $\rho\delta$ (произведения удельного сопротивления покрытия на его толщину).

Эксперименты проводились при значениях Рейнольдса порядка $(8...70) \cdot 10^3$ в поперечном магнитном поле с величиной индукции до 1 Тл. при

температурах 100, 200, 300°C – на трубах, изготовленных из стали и ванадиевого сплава, 100°C – на стеклянной трубе.

Экспериментальные исследования МГД - сопротивления потоку галлиевого теплоносителя в поперечном магнитном поле заключались в измерении перепада давления на участке контура, проходящем в зазоре тороидального сердечника электромагнита. Результаты экспериментов представлены на графиках зависимости коэффициента сопротивления λ от критерия Стоарта $N = Na^2/Re$ (рис. 2, 3). Здесь под коэффициентом сопротивления λ понимается сумма гидравлического сопротивления трения и некоторой добавки, обусловленной действием магнитного поля: $\lambda = \lambda_0 + \lambda_M$

Материаловедческий анализ внутренней поверхности фрагментов труб экспериментального участка контура после проведения экспериментов показал значительное (на величину порядка 100...800%) увеличение толщины оксидных отложений по сравнению с образцами, изготовленными из труб с покрытиями в состоянии поставки (как на стальных, так и на образцах из ванадиевого сплава), что однозначно подтверждает тот факт, что во время обработки трубопроводов в галлиевом циркуляционном контуре осуществлялся процесс формирования на внутренних стенках труб оксидных покрытий, состоящих из оксидов теплоносителя и компонент конструкционного материала. Средняя скорость роста толщины покрытий составила величину порядка 10^{-10} м/с

Результаты измерений по определению электрофизических характеристик ЭИП на образцах конструкционных материалов, помещенных в специальную емкость показали, что величина $\rho\delta$ для всех способов формирования ЭИП была одинаковой и стабилизировалась на следующих значениях: $(2,47...2,64) \cdot 10^{-5}$ Ом·м² для стали 08X18H10T и $(6,12...6,29) \cdot 10^{-5}$ Ом·м² для ванадиевого сплава, что в достаточной степени совпадает с результатами экспериментов, проведенных ранее.

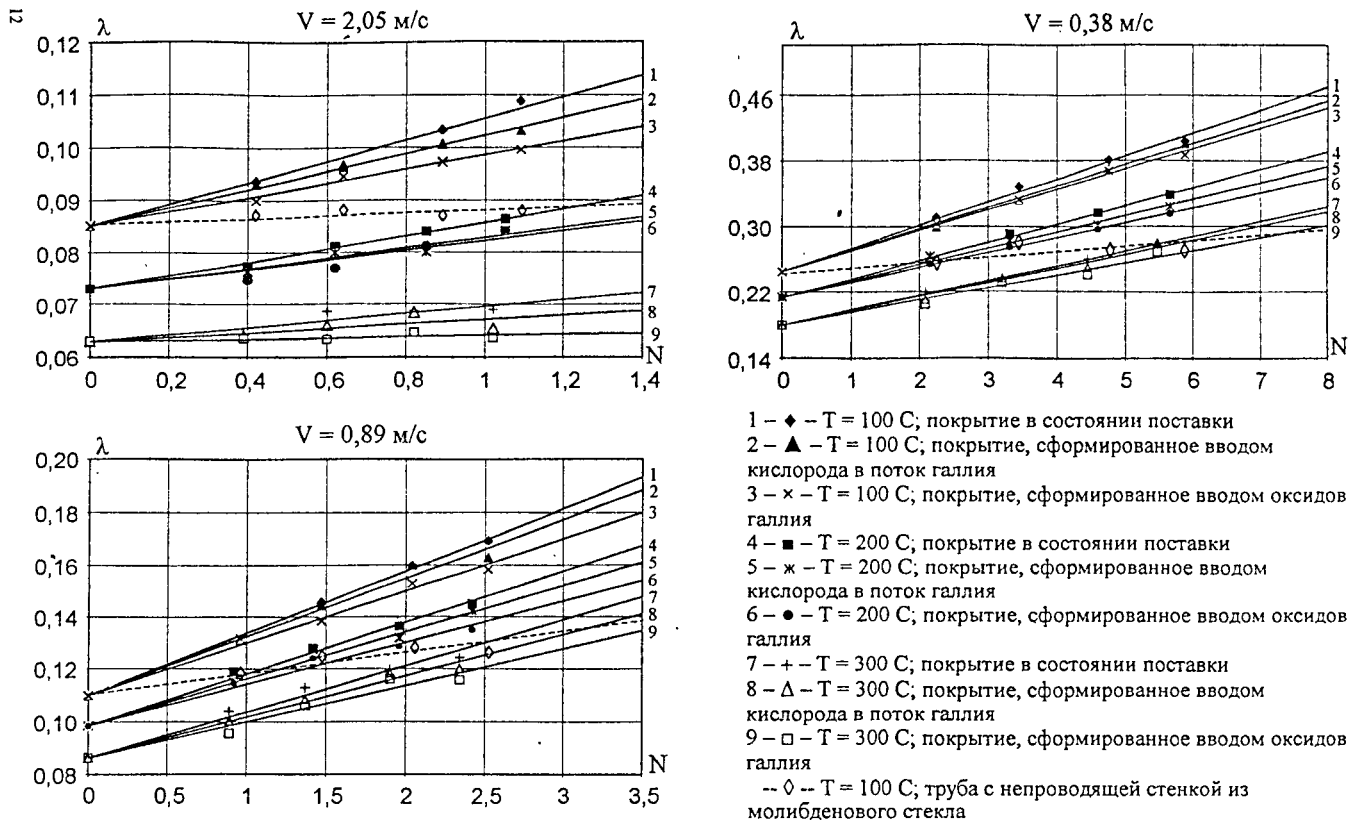
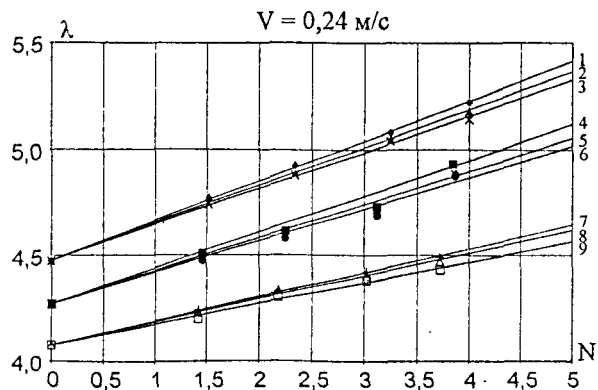
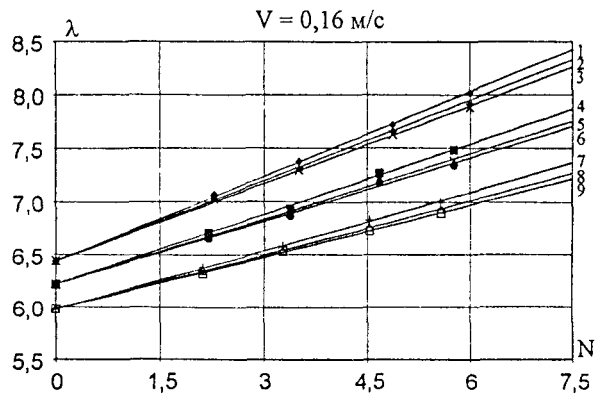
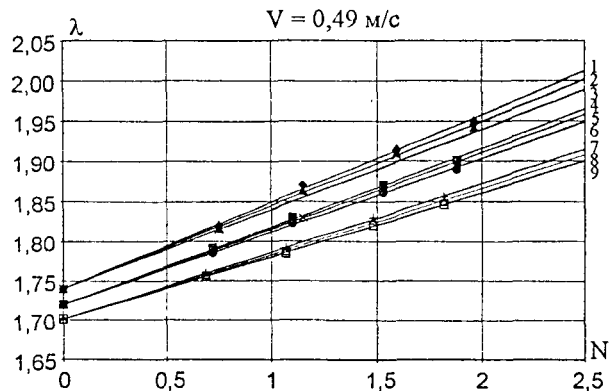


Рис.2. Зависимость коэффициента сопротивления λ от числа Стюарта $N = \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}}$ на экспериментальном участке из стали 08X18H10T



- 1 - ◆ - $T = 100 \text{ C}$; покрытие в состоянии поставки
- 2 - ▲ - $T = 100 \text{ C}$; покрытие, сформированное вводом кислорода в поток галлия
- 3 - × - $T = 100 \text{ C}$; покрытие, сформированное вводом оксидов галлия
- 4 - ■ - $T = 200 \text{ C}$; покрытие в состоянии поставки
- 5 - ж - $T = 200 \text{ C}$; покрытие, сформированное вводом кислорода в поток галлия
- 6 - ● - $T = 200 \text{ C}$; покрытие, сформированное вводом оксидов галлия
- 7 - + - $T = 300 \text{ C}$; покрытие в состоянии поставки
- 8 - Δ - $T = 300 \text{ C}$; покрытие, сформированное вводом кислорода в поток галлия
- 9 - □ - $T = 300 \text{ C}$; покрытие, сформированное вводом оксидов галлия

Рис.3. Зависимость коэффициента сопротивления λ от числа Стюарта $N = \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}}$ на экспериментальном участке из ванадиевого сплава

Погрешности выполненных в данной главе измерений составляют следующие значения:

- $\pm 9,5\%$ – для измерения величины расхода галлиевого теплоносителя;
- $\pm 2,9\%$ - для измерения величины перепада давления на экспериментальном участке;
- $\pm 64,5\%$ - для измерения величины рД.

Проведенные исследования путем прямого замера МГД - сопротивления потоку галлия в поперечном магнитном поле подтвердили возможность создания и поддержания ЭИП на внутренней поверхности труб из аустенитной стали 08X18H10T и ванадиевого сплава в режиме циркуляции в диапазоне температур 100 - 300°C и величинах напряженности поперечного магнитного поля до 1,0 Тл.

Анализируя зависимости, полученные в результате обработки экспериментальных данных (рис. 2, 3), следует отметить, что решающим фактором при определении величины коэффициента сопротивления потоку галлия в поперечном магнитном поле (при больших значениях критерия Стюарта) является зависимость электромагнитной составляющей коэффициента сопротивления λ_m от температуры.

Полученные результаты могут быть использованы в инженерных расчетах для определения ожидаемого МГД - сопротивления течению потока галлиевого теплоносителя в каналах в поперечном магнитном поле.

В четвертой главе приводятся результаты исследований по определению возможности контроля термодинамической активности кислорода в галлиевом теплоносителе методом гальванического концентрационного элемента с целью подтверждения концепции использования метода гальванического концентрационного элемента для контроля термодинамической активности кислорода в галлиевом теплоносителе при формировании и доформировании ЭИП в условиях работы системы охлаждения дивертора ТЯР.

Для проведения экспериментов были выбраны две схемы ГКЭ:

Схема I: $Pb + PbO \parallel \text{Твердый электролит} \parallel Ga$

Схема II: $Ga + GaO \parallel \text{Твердый электролит} \parallel Ga$

На основе выбранных схем ГКЭ была смонтирована экспериментальная установка, в состав которой входят: электрообогреваемая и теплоизолированная нагревательная емкость, снабженная патрубками подвода и отвода защитного газа. Внутри нее на специальной подставке размещена стеклянная емкость, заполненная расплавленным теплоносителем (галлием). Под слой теплоносителя погружена нижняя часть трубки электролита, изготовленной из диоксида циркония с находящемся в ней металлом – эталоном (свинцом или галлием) с концентрацией кислорода в состоянии насыщения, что достигалось введением на поверхность металла его оксидов. Верхняя часть трубки электролита герметично закреплена в крышке нагревательной емкости с помощью уплотнения, обеспечивающего возможность перемещения трубки электролита в вертикальном направлении.

Циркуляция теплоносителя внутри стеклянной емкости организовывалась вращением осевого колеса, соединенного валом с электродвигателем. Для регулирования концентрации кислорода в теплоносителе установка была снабжена каналом ввода раскислителя. Установка также имела барботажную трубку для продувки теплоносителя аргоно – кислородной смесью и водородом.

Методика экспериментов заключалась в измерении ЭДС, развиваемой элементами в зависимости от времени при различном содержании в контролируемом ЖМТ термодинамически активного кислорода в режимах естественной и принудительной циркуляции. Измерение величины ЭДС проводилось при температуре теплоносителя 400°C. Результаты проведения экспериментов отражены на рис. 4, 5. Результаты сравнения величин ЭДС элемента, полученных при различных режимах циркуляции теплоносителя (естественная либо принудительная циркуляция) показали, что режим циркуляции не оказывает влияния на величину развиваемой элементом ЭДС.

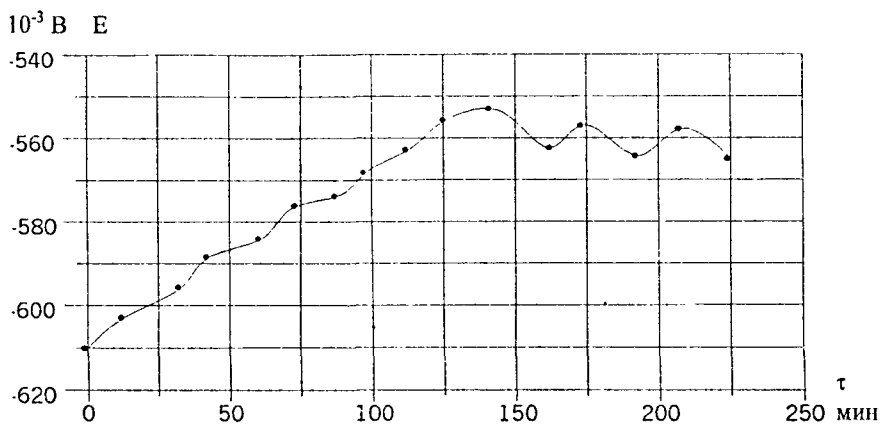
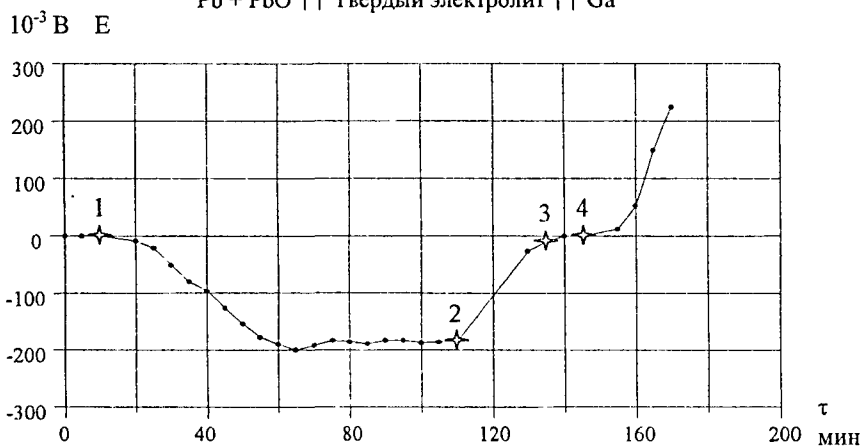
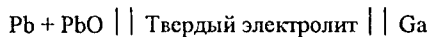


Рис. 4. Изменение ЭДС ГКЭ, собранного по схеме:



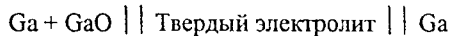
1 – Момент ввода раскислителя;

2 – Начало подачи в теплоноситель аргоно – кислородной смеси;

3 – Прекращение подачи в теплоноситель аргоно – кислородной смеси;

4 – Начало подачи в теплоноситель водорода.

Рис. 5. Изменение ЭДС ГКЭ, собранного по схеме:



Погрешность определения величины ЭДС элемента определяется по паспортным данным вольтметра и составляет величину порядка 9,5 %

Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность контроля термодинамической активности кислорода в галлиевом теплоносителе методом гальванического концентрационного элемента с твердым электролитом, изготовленным на основе диоксида циркония при температурах теплоносителя в контуре порядка 400°C.

В пятой главе приводятся результаты расчета величины возможных термоударов, возникающих на поверхности пластины дивертора, контактирующей с теплоносителем при концептуально существующей в настоящее время импульсной работе термоядерного реактора, а так же результаты экспериментальных исследований влияния термоциклических нагрузок (термоударов) на характеристики электроизолирующих покрытий (ЭИП) на поверхностях конструкционных материалов, помещенных в галлиевый теплоноситель. Результаты консервативного расчета показали, что средняя величина возможных термоциклических нагрузок в центральной части бериллиевой пластины дивертора составляет порядка 17°C/с.

Экспериментальные исследования стойкости оксидных электроизолирующих покрытий при воздействии термоциклических нагрузок проводились на установке, в состав которой входили: нагревательная емкость, заполненная расплавленным теплоносителем с температурой 350°C, под уровень которого с помощью гермовводов устанавливались исследуемые образцы (электроды), изготовленные из стали 12X18H10T и ванадиевого сплава (5% - Ti, 6% - Cr, 0,15% - примеси, остальное - ванадий). Для охлаждения теплоносителя под уровень сплава был помещен змеевиковый теплообменник, охлаждаемый водой с температурой на входе порядка 10°C. Изменение температуры сплава в районе образцов-электродов при термоударах составляло порядка 150 - 200°C, с величинами термоударов порядка $16 \div 20^\circ\text{C}/\text{с}$, что сопоставимо с величиной возможных термоударов в материалах дивертора при

возрастании тепловой нагрузки на пластину от 0 до 20 МВт/м² за время порядка 10 с в переходных режимах работы.

В целом, в пределах погрешности эксперимента, можно считать, что уменьшения величины удельного электросопротивления ЭИП $\rho_{\text{д}}$ после проведения серии из 20 термоударов не произошло как на стальных образцах, так и на образцах из ванадиевого сплава.

Проведенные эксперименты показали принципиальную возможность формирования и поддержания в рабочем состоянии оксидных электроизолирующих покрытий на поверхностях конструкционных материалов, контактирующих с галлиевым теплоносителем при работе ЭИП в условиях термодинамических нагрузок, по крайней мере, при содержании кислорода в теплоносителе на линии насыщения или близко к ней. Значение величины удельного электросопротивления ЭИП при температуре 350°C составило: $2,79 \cdot 10^{-5}$ Ом·м² для стали 12Х18Н10Т; $6,24 \cdot 10^{-5}$ Ом·м² для ванадиевого сплава и не зависит от количества проведенных термоударов, что сравнимо с значениями величины $\rho_{\text{д}}$ оксидных покрытий, сформированных на поверхности конструкционных материалов до проведения термоударов. Отсутствие заметного уменьшения величины $\rho_{\text{д}}$ после всех циклов термоударов может косвенно указывать либо на отсутствие заметного разрушения (растрескивания) при термоударах покрытий (заведомо имеющих различные КТУ с основным металлом), либо на эффективное доформирование разрушающихся участков покрытий.

В шестой главе отражены научно – технические рекомендации, предлагаемые на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований по технологии галлиевого теплоносителя, предусматривающей формирование и доформирование оксидных электроизолирующих покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура охлаждения дивертора токамака.

Сравнительные экспериментальные исследования различных технологий формирования и доформирования покрытий в разделах 2 и 3 диссертации показали возможность реализации этих технологий в условиях галлиевого циркуляционного контура.

На данной стадии исследований для последующей разработки рекомендуются три основных технологии формирования и доформирования оксидных электроизолирующих покрытий на поверхностях конструкционных материалов, контактирующих с галлиевым теплоносителем:

- с дозированным вводом кислорода (или оксидов в газовой (паровой) фазе) в газовый объем над свободным уровнем галлиевого теплоносителя в проточной буферной емкости (компенсаторе объема) контура;
- с эжекцией кислородосодержащих газовых (газопаровых) смесей потоком галлия с насыщением кислородом циркулирующего потока галлиевого теплоносителя из объема газовых пузырей, эжктируемых потоком;
- с растворением гранул (либо в другой форме) оксида галлия, помещенных в проточную емкость с регулируемой температурой нагрева оксидов и омывающего их теплоносителя;

Дозированный ввод кислорода в газовый объем контура, в зависимости от конкретного исполнения контура, рекомендуется производить следующими основными способами:

- регулируемой подачей газовой (газопаровой) кислородосодержащей смеси из баллонов компрессором с переменной производительностью;
- регулируемой подачей газовой (газопаровой) кислородосодержащей смеси из баллонов через дросселирующее устройство, регулирующийся и запорный вентиля;

- подачей кислорода, генерируемого путем регулируемого термического разложения кислородосодержащих веществ (марганцовокислого калия или др.);
- подачей увлажненного кислорода, генерируемого путем регулируемого электролиза воды;
- другие способы (или комбинация вышеперечисленных) ввода примеси кислорода.

Дозированный ввод кислорода в поток циркулирующего галлиевого теплоносителя, в зависимости от конкретного исполнения контура, рекомендуется производить следующими основными способами:

- регулируемой подачей (за счет регулирующего газового вентиля) и эжекцией потоком галлия "двойной" газовой смеси (аргон + кислород, гелий + кислород) из газового объема контура с последующей сепарацией непрореагировавшей газовой смеси в буферной емкости (компенсаторе объема);
- регулируемой подачей (за счет регулирующего газового вентиля) и эжекцией потоком галлиевого теплоносителя "тройной" (увлажненной) газовой смеси (аргон + кислород + водяной пар, гелий + кислород + водяной пар) с пропуском эжектируемого потоком газа через барботер с водой с регулируемой температурой подогрева воды; последующая сепарация непрореагировавшей газовой смеси осуществляется в буферной емкости (компенсаторе объема);
- регулируемым вводом газовой (газопаровой) смеси из баллонов в поток галлия за счет избыточного давления газа в баллоне над давлением галлия в точке ввода газа;
- насыщением потока галлиевого теплоносителя оксидами галлия при регулируемом изменении температуры емкости с оксидами, омываемыми потоком теплоносителя.

На основании проведенных исследований автор рекомендует использовать для контроля содержания термодинамически активного кислорода в галлиевом теплоносителе датчик на основе твердого гальванического концентрационного элемента, например, на основе диоксида циркония (раздел 4 диссертации). Указанные датчики рекомендуется устанавливать до и после элементов охлаждения дивертора, например, до и после напорного и сливного коллекторов. Число датчиков в каждом месте их установки рекомендуется не менее трех для получения представительных результатов замера. Ввод кислородосодержащих веществ в галлиевый контур, в его газовую систему или поток галлия должен осуществляться и прекращаться по сигналам от датчика термодинамически активного кислорода в галлии. Значение величины термодинамической активности кислорода в галлии в конкретном контуре рекомендуется поддерживать в диапазоне, определяемом температурным режимом, а также примененными конструкционными материалами.

Следует отметить, что оптимальным техническим решением была бы комплексная система контроля и регулирования содержания примесей в галлиевом теплоносителе, в контуре ЖМТ и в системе защитного газа, одной из функций которой было бы контроль и регулирование окислительного потенциала галлиевого теплоносителя с целью формирования, доформирования и обеспечение работоспособности оксидных ЭИП на поверхностях конструкционных материалов контура, контактирующих с галлиевым теплоносителем.

Заключение

- Проведены теоретические исследования процессов массопереноса оксидов теплоносителя и примесей в контуре системы охлаждения дивертора ТЯР;
- Проведены теоретические и экспериментальные исследования по выбору и обоснованию способов формирования ЭИП, обеспечивающих

возможность создания жидкометаллической системы охлаждения дивертора ТЯР на основе галлиевого теплоносителя;

- Выполнены теоретические и экспериментальные работы по исследованию характеристик защитных ЭИП, сформированных в различных условиях в зависимости от температуры и индукции магнитного поля;

- Рассчитана максимальная величина термоударов, возможных в системе охлаждения дивертора ТЯР;

- Выполнены теоретические и экспериментальные работы по исследованию характеристик защитных ЭИП при воздействии на них термоциклических нагрузок в зависимости от температуры, плотности тока;

- Проведены экспериментальные исследования по определению МГД - сопротивления при течении галлиевого теплоносителя в каналах из стали и ванадиевого сплава в поперечном магнитном поле индукцией до 1,0 Тл;

- Проведены исследования по определению величины термодинамической активности кислорода в галлиевом теплоносителе методом гальванического концентрационного элемента.

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

1. Безносков А. В., Щербачков Р. В., Бутов А. А., Романов П. В. Применение жидких металлов для охлаждения дивертора "токамака". "Ядерная энергетика", № 6, 1995 г., с. 66 – 72
2. Романов П. В., Безносков А. В., Кузьминых С. А., Бутов А. А., Парфенова Л. А. Экспериментальное исследование МГД – сопротивления и характеристик электроизолирующих покрытий на конструкционных материалах систем охлаждения токамака жидкометаллическими теплоносителями. "Вопросы атомной науки и техники", серия "Термоядерный синтез", выпуск 11 – 12, 1998.
3. Романов П. В., Безносков А. В., Бутов А. А., Кузьминых С. А., Захватов В. Н., Мелузов А. Г. Влияние термоциклических нагрузок на характеристики

- электронизолирующих покрытий конструкционных материалов в контурах охлаждения blankets и divertora с жидкометаллическими теплоносителями. "Вопросы атомной науки и техники", серия "Термоядерный синтез", выпуск 2, 1999, с. 66 - 72.
4. Безносов А. В., Дмитриев С. М., Бутов А. А., Захватов В. Н., Романов П. В. Экспериментальные исследования МГД – сопротивления потока Pb, Pb–Bi, Pb–Li, Ga, Li в поперечном магнитном поле. Сборник тезисов докладов международной конференции "Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях" ТЖМТ - 98, с. 28
 5. Безносов А. В., Бутов А. А., Щербаков Р. В., Романов П. В. Экспериментальные исследования в обоснование концепции охлаждения divertora токамака галлиевым теплоносителем. Сборник тезисов докладов международной конференции "Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях" ТЖМТ - 98, с. 37
 6. Бутов А. А., Парфенова Л. А. Экспериментальное исследование МГД – сопротивления и характеристик электроизолирующих покрытий на конструкционных материалах систем охлаждения токамака жидкометаллическими теплоносителями. Сборник тезисов докладов третьей нижегородской сессии молодых ученых, с. 92
 7. Бутов А. А., Захватов В. Н., Семенов А. В. Влияние термоциклических нагрузок на характеристики электроизолирующих покрытий конструкционных материалов в контурах охлаждения blankets и divertora с жидкометаллическими теплоносителями. Сборник тезисов докладов четвертой нижегородской сессии молодых ученых, с. 106
 8. Безносов А. В., Кузьминых С. А., Бутов А. А., Мелузов А. Г., Романов П. В., Парфенова Л. А. Экспериментальное исследование МГД – сопротивления и характеристик электроизолирующих покрытий на конструкционных материалах систем охлаждения токамака жидкометаллическими теплоносителями. Нижегородский государственный технический университет, отчет, № г. р. 01940002164, УДК 539.1.08, Инв. № 02970003864