УДК 538.97

На правах рукописи

Жарков Михаил Юрьевич

СОЗДАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РАЗРАБОТКА ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ ЭНЕРГОНАПРЯЖЁННЫХ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКА НА ОСНОВЕ ЛИТИЕВЫХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ

Специальность 01.04.07 — Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Москва — 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"»

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ **Бондаренко Геннадий Германович**
Официальные оппоненты:	**Пименов Валерий Николаевич,** доктор физико-математических наук, ФГБУ науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, заведующий лабораторией
	Волков Николай Викторович, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», доцент кафедры физических проблем материаловедения
Ведущая организация:	НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Институт Теоретической и Экспериментальной физики»

Защита состоится «17» февраля 2016 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» и на сайтах www.bmstu.ru, www.bmstu-kaluga.ru.

Автореферат разослан «_____» _____2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент **Лоскутов Сергей Александрович**

ан 41к

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Освоение термоядерного источника энергии на основе дейтериево-тритиевой реакции привело к идее создания Интернационального термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) с мощностью до 500 МВт. Как известно, все внутрикамерные энергонапряжённые элементы этого реактора предполагается выполнять из бериллия, вольфрама и углеволокнистого композита. Однако уже сейчас понятно, что эти материалы в твёрдой фазе при расчётных нагрузках будут работать на пределе своих возможностей. Доказано, что будут иметь место растрескивание и распыление материалов. В связи с этим переход от ИТЭР к Демонстрационному термоядерному реактору (ДЕМО) в свете материаловедческой проблемы представляется затруднённым. Возможным решением этой задачи представляется использование лития в жидкой фазе совместно с капиллярно-пористыми системами (КПС) для стабилизации жидкой поверхности.

Эксперименты на токамаке Т11-М продемонстрировали, что эффективным механизмом охлаждения периферии плазмы, а, следовательно, и защиты контактирующих с плазмой поверхностей в условиях квазистационарного разряда, может служить некорональное излучение постоянно циркулирующих между плазмой и защищаемой поверхностью атомов и ионов лития. Эффект «экранирования» позволяет рассеять почти 80% всей энергии омического нагрева на стенки вакуумной камеры посредством ультрафиолетового излучения и может послужить основой концепции замкнутой литиевой петли в стационарно работающих токамаках с литиевыми эмиттером и коллектором (Рисунок 1). Она предполагает создание замкнутой петли циркуляции лития на границе плазменного шнура с предварительно нагретым (до 400-700°С) лимитером, выступающим в роли эмиттера, и вторым более холодным лимитером в его тени — литиевым коллектором. К моменту начала настоящего диссертационного исследования были проведены испытания рельсового горизонтального лимитера на основе литиевых капиллярно-пористых систем, получены эмиссионные характеристики литиевых КПС, данные об удержании ими дейтерия, подтверждена их совместимость с плазмой токамака, подтверждено полное удержание жидкого лития твёрдой матрицей КПС и проведены первые эксперименты по исследованию закономерностей осаждения лития. Реализация этой концепции защиты в настоящей работе потребовала создание различных вариантов литиевых устройств.

В процессе работы некоторая часть лития будет неизбежно оседать на внутренних стенках вакуумной камеры, что может привести к аварийным ситуациям. К моменту начала настоящего диссертационного исследования все технологические операции по очистке вакуумной камеры от плёнок лития сводились к трудоёмкой работе с разгерметизацией камеры и последующим смыванием лития обычной водой. По мере развития концепции замкнутой литиевой петли этот вопрос будет требовать более технологичного решения.

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

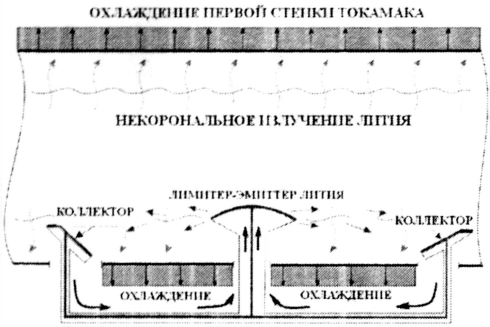


Рисунок 1. Концепция замкнутой литиевой петли

В настоящее время в качестве основного конструкционного материала всё большее внимание привлекают сплавы на основе ванадия. Основным преимуществом этих сплавов является пониженный уровень наведённой радиоактивности в сочетании с высокими жаропрочностью, стойкостью в жидких теплоносителях, теплопроводностью и низким удельным весом. Переход с нержавеющей стали на ванадиевые сплавы является целесообразным для внутрикамерных литиевых устройств с активным охлаждением эвтектическим сплавом Na-K в ИТЭР-подобных токамаках с высокой нейтронной нагрузкой. Основной недостаток ванадиевых сплавов заключается в их чувствительности к неметаллическим примесям (азот, кислород, углерод), неизбежно присутствующим в щелочных металлах. К моменту начала настоящего диссертационного исследования экспериментально не была подтверждена совместимость этих материалов с жидким литием и эвтектическим сплавом Na-K, поэтому исследования в этом направлении — важная составляющая представленной диссертации.

Цель работы и задачи исследований.

Цель работы — развитие технического и технологического решения проблемы защиты энергонапряжённых внутрикамерных элементов токамаков с помощью капиллярно-пористых систем.

Задачи исследований:

1. Создание различных моделей внутрикамерных литиевых устройств токамака на основе капиллярно-пористых систем.
2. Экспериментальное подтверждение функциональности и эффективности устройств.
3. Решение проблемы удаления тонких плёнок лития со стенок вакуумной камеры без её разгерметизации.
4. Исследование сплавов на основе ванадия в качестве конструкционных материалов для литиевых устройств, в частности, исследование коррозионной стойкости материалов с жидким литием и эвтектическим сплавом Na-K.

Научная новизна работы:

1. Впервые созданы модели внутрикамерных энергопринимающих устройств токамака Т-11М различной конфигурации на основе литиевых капиллярно-

пористых систем: кольцевой, вертикальный, продольный литиевые лимитеры.

2. Апробирована оригинальная методика удаления тонких плёнок лития со стенок вакуумной камеры токамака без её разгерметизации. Разработана криогенная мишень и установлены зависимости эффективности сбора лития от различных факторов.
3. В результате исследований динамики переноса лития в разрядах с литиевыми лимитерами экспериментально получены распределения лития в SOL (scrape-off-layer, область разомкнутых силовых линий магнитного поля) токамака. В соответствии с полученными результатами выработана схема прототипа стационарного токамака-реактора с внутрикамерными элементами на основе литиевых капиллярно-пористых систем.
4. Исследована и экспериментально доказана возможность применения в качестве конструкционных материалов литиевых внутрикамерных элементов токамаков сплавов на основе ванадия.

Теоретическая значимость работы:

В работе построена модель теплового взаимодействия принимающей поверхности разработанных устройств с потоками заряженных частиц токамака и излучения плазмы в течение разряда. Получены распределения тепловых потоков по обращённой к плазме поверхности внутрикамерных устройств токамака. В экспериментах на токамаке Т-11М получены распределения эмитированного лития в SOL токамака. В экспериментах с криогенной мишенью для сбора лития получены конкретные зависимости эффективности сбора лития от различных факторов (остаточный вакуум, наличие дополнительных электрических и магнитных полей, вид рабочего газа тлеющего разряда, подогрев стенок камеры токамака и др.). Результаты экспериментов на токамаке Т-11М с литиевыми устройствами могут быть положены в основу разработок внутрикамерных элементов для таких установок как термоядерный источник нейтронов (ТИН-0), ИТЭР и ДЕМО.

В экспериментах по взаимодействию сплавов ванадия с жидким литием и сплавом Na-K эвтектического состава выявлен основной механизм коррозии — диффузия неметаллических примесей (в первую очередь кислорода). Показано, что предварительное облучение ионами аргона не влияет на коррозионную стойкость образцов (в основном из-за процесса отжига на первом этапе исследования), но повышает интенсивность диффузии атомов кислорода. Продемонстрировано прямое влияние температуры на коррозионные процессы.

Практическая значимость работы:

Разработанные устройства установлены на токамак Т-11М и успешно испытаны. Результаты проведённых испытаний подтвердили принципиальную возможность достижения стационарных режимов токамака-реактора с внутрикамерными элементами на основе литиевых капиллярно-пористых систем. Результаты материаловедческих исследований на совместимость лития со сплавами на основе ванадия могут быть использованы в конструкторских

работах по созданию внутрикамерных элементов токамаков и компонентов ядерных реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Подтверждением практической ценности работы является справка о внедрении созданных устройств, выданная в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе были использованы экспериментальные и расчетные методы исследований. Экспериментальные данные распределения лития в SOL токамака получены методами рекомбинационной мишени и химического титриметрического анализа. Материаловедческие исследования сплавов на основе ванадия проводились микрорентгеноспектральным, рентгеновским фазовым, металлографическим, гравиметрическим методами анализа, методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, методами измерения микротвёрдости Виккерса и кинетической твёрдости.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование и выбор конкретных конструкций внутрикамерных устройств токамака на основе литиевых капиллярно-пористых систем.
2. Результаты исследований эффективности работы созданных устройств.
3. Результаты исследований коррозионной стойкости, изменения механических свойств и морфологии поверхности сплавов на основе ванадия в жидком литии и расплаве Na-K эвтектического состава.

Достоверность полученных результатов. Результаты получены с применением современного, высокоточного и метрологически аттестованного оборудования по стандартным методикам и ГОСТам. Достоверность тепловых расчётов созданных устройств, подтвердилась измерением в ходе экспериментов температуры контактирующей с плазмой поверхности и корреляцией полученных зависимостей с характером механических разрушений материала-основы КПС вышедших из эксплуатации устройств.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались на следующих конференциях: 25th IAEA Fusion Energy Conference (Санкт-Петербург, 2014 г.); XLI и XLII Международных (Звенигородских) конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2014, 2015 гг.); The 11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology-11 (Барселона, 2013 г.); XXII, XXIII, XXIV и XV Международных конференциях «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 2012, 2013, 2014 и 2015 гг.); XV, XVI, XVII и XVIII Всероссийских конференциях «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (НИЯУ МИФИ, Москва, 2012, 2013, 2014 и 2015 гг.); XIII и XV Межвузовских научных школах молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (НИИЯФ МГУ, Москва, 2012 и 2014 гг.); X Международном уральском семинаре «Радиационная физика металлов и сплавов» (Кыштым, 2013); Всероссийской конференции «Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах» (Обнинск, 2013 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 30 печатных работ, в т.ч. 8 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 статья в зарубежном журнале, а также 21 публикация в сборниках тезисов докладов и материалах конференций.

Структура и объём диссертации. Вся диссертация изложена на 188 страницах, включая 110 рисунков, 17 таблиц и 90 наименований в списке литературы. Структурно диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы.

Личный вклад автора. Являясь ведущим конструктором АО «Красная звезда», автор диссертации лично разработал литиевые внутрикамерные устройства токамака Т-11М, контролировал процесс их изготовления и испытаний. Вся экспериментальная часть выполнялась им на токамаке Т-11М в сотрудничестве с коллективом АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». В ходе экспериментальных кампаний автор занимался обработкой полученных данных в целях рационализации конструкции созданных устройств. В ходе материаловедческих исследований перспективных материалов на основе ванадия автор разработал испытательные стенды, провёл расчёты конвективных потоков рассматриваемой коррозионно-агрессивной среды, непосредственно контролировал ход эксперимента, а также лично провёл испытания механических свойств образцов с последующей обработкой результатов.

Автор выражает глубокую благодарность к.т.н. Люблинскому И.Е. и к.т.н. Верткову А.В. (АО «Красная звезда», г. Москва) за консультации в процессе расчёта и создания внутрикамерных элементов токамака Т-11М, д.т.н. профессору Мирнову С.В. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва) за помощь в экспериментальных исследованиях литиевых устройств на токамаке Т-11М и своему научному руководителю д.ф.–м.н. профессору Бондаренко Г.Г. (МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва) за всестороннюю помощь и поддержку в ходе диссертационного исследования.

Основное содержание работы

В диссертации изложено новое научно-обоснованное техническое и технологическое решение проблемы защиты внутрикамерных элементов токамаков (в первую очередь лимитеров и дивертора) от экстремальных тепловых нагрузок с конкретными разработками для его реализации.

Во ***введении*** кратко сформулирована актуальность темы, степень её разработанности, поставлены цели и задачи, обозначены практическая и теоретическая ценности работы, научная новизна, методы исследований, достоверность полученных результатов и положения, выносимые на защиту. В силу того, что диссертация выполнялась в рамках коллективной научно-исследовательской работы, был указан личный вклад автора. В заключении представлен список научных работ и конференций, на которых фигурировали основные результаты настоящего диссертационного исследования.

В ***первой главе*** рассмотрено развитие концепции использования лития в токамаках, описаны эксперименты, проведённые различными авторами, подтверждающие возможности лития как внутрикамерного материала токамака: эксперименты по распылению лития атомами дейтерия, удержанию дейтерия жидким литием и др. Описаны эксперименты с первыми образцами литиевых лимитеров на токамаках Т-11М и FTU. В конце главы рассмотрена концепция замкнутой литиевой петли, позволяющая осуществить стационарную защиту внутрикамерных элементов токамака.

Во ***второй главе*** описываются экспериментальная установка и методики проведения экспериментов. Литиевые лимитеры, созданные в ходе диссертационного исследования, были испытаны на токамаке Т-11М. Характеристики токамака даны в Таблице 1. Внутрикамерные элементы токамака: горизонтальный, вертикальный, кольцевой и продольный литиевые лимитеры, графитовый лимитер, криогенная мишень.

Таблица 1.

Характеристики токамака Т-11М

Характеристика	**Значение**
Большой радиус тора, м	0,7
Малый радиус тора, м	0,25
Тороидальное магнитное поле на оси тора, Тл	1,2
Длительность разряда, с	0,1…0,3
Ток в плазме, кА	7…100
Тепловой поток на поверхность лимитера, МВт/м^2	4…12
Рабочее вещество	H_2, D_2, He

Измерения распределения лития в SOL токамака проводились методом рекомбинационной мишени. Суть метода состоит в регистрации рекомбинационного излучения ионов лития, приходящих на специальную мишень (графитовый лимитер), которая имеет возможность перемещения относительно центра плазмы для «сканирования» всего SOL токамака. Абсолютное количество лития в экспериментах определялось путём погружения образцов сетки с захваченным литием в кипящую воду и последующим химическим титриметрическим анализом. Анализ миграции примесей в камере Т-11М осуществлялся путём экспонирования образцов сетки из нержавеющей стали в плазме с последующим анализом на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным рентгеновским анализатором.

В конце главы рассмотрена методология экспериментов по определению коррозионной стойкости, структурных изменений и изменений механических свойств ванадия и ванадиевых сплавов в жидком литии и расплаве Na-K эвтектического состава. Исследования проводились путём выдержки образцов в коррозионно-агрессивной среде («ампульные испытания»). Схемы проведения экспериментов представлены на Рисунках 2 и 3. После вскрытия ампул измерялись микротвёрдость (на приборах 401/402 MVD, ПМТ-3М и Nanotest),

масса образцов (на аналитических лабораторных весах ВЛР-200 и АДВ-200), проводился микрорентгеноспектральный анализ на растровом электронном микроскопе ZEISS EVO 50XV с приставкой INCA X-act и рентгеновский фазовый анализ на дифрактометре ДРОН-7. Полученные данные сравнивались с показателями образцов до эксперимента. Топография поверхности образцов исследовалась до и после выдержки в среде на оптическом металлографическом микроскопе Neophot и сканирующем электронном микроскопе JSM-35CF.

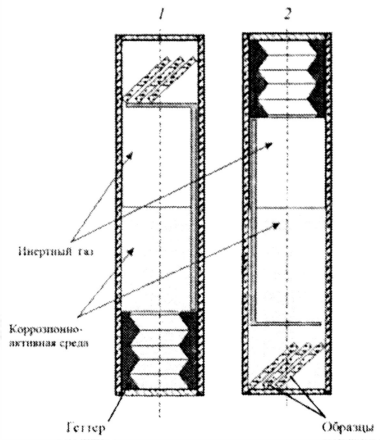


Рисунок 2. Схема проведения экспериментов по исследованию коррозионного взаимодействия ванадиевых сплавов в статичных условиях (метод «переворота» ампулы)

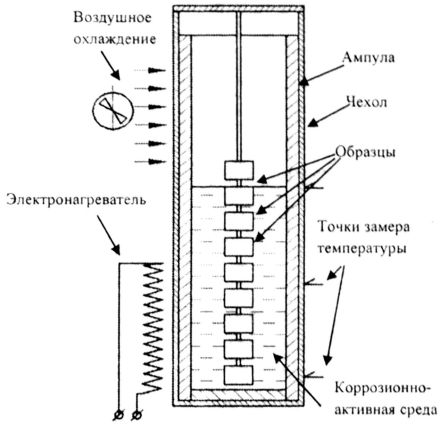
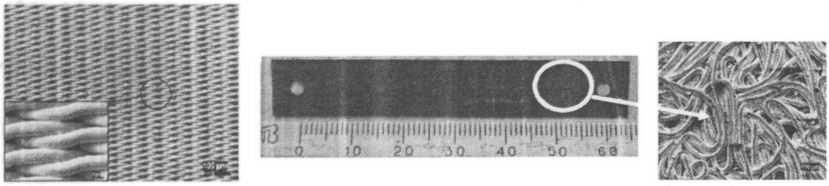


Рисунок 3. Схема проведения экспериментов по исследованию коррозионного взаимодействия ванадиевых сплавов в конвективном потоке

Третья глава посвящена созданию внутрикамерных литиевых устройств. Перечислены требования к ним, рассмотрены вопросы выбора материала-основы КПС устройств. В созданных устройствах были применены: сетка тканая из нержавеющей стали аустенитного класса с эффективным радиусом пор 30 мкм и элементы из прессованной вольфрамовой проволоки (Рисунок 4). Внутрикамерные устройства токамаков подвергаются значительным тепловым нагрузкам (до 10 – 20 МВт/м^2). Воздействие таких тепловых потоков может привести к перегреву литиевой поверхности, что в свою очередь приведёт к интенсивному испарению лития и срыву разряда. В диссертационной работе приведена методика оценочного расчёта теплового состояния устройств.



а б

Рисунок 4. Материал-основа КПС: сетка тканая из нержавеющей стали (а) и элементы из прессованной вольфрамовой проволоки (б)

Рассмотрены следующие устройства токамака Т-11М: кольцевой, вертикальный, продольный лимитеры и криогенная мишень (Рисунок 5). Для каждого из них было дано подробное описание конструкции и проведён тепловой расчёт в два этапа: расчёт теплового состояния в ходе предварительного нагрева до температуры плавления лития и расчёт теплового состояния в ходе плазменного разряда. На первом этапе решалось уравнение теплопроводности с учётом излучения (1) численными методами:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + Q_{\text{н}} - (Q_{\text{изл}} + Q_{\text{теплопр}}) = 0; \qquad (1)$$

где $Q_{\text{н}}$ — мощность электрического нагревателя, $Q_{\text{изл}}$ и $Q_{\text{теплопров}}$ — тепловые потери в результате излучения и теплопроводности в стенки конструкции. В результате было получено распределение температуры, гарантирующее плавление лития во всех точках устройства. Второй этап расчёта предполагал расчёт распределения тепловой нагрузки по принимающей поверхности, выявление самых теплонапряжённых точек и расчёт увеличения температуры в них за время плазменного разряда. Расчёт распределения тепловой нагрузки от воздействия плазмы выполнялся на основе работы [1] с некоторыми поправками (учтено различие температур ионной и электронной компонент). В основу расчёта положена экспоненциальная зависимость теплового потока, переносимого частицами в SOL токамака, от расстояния между последней замкнутой магнитной поверхностью и рассматриваемой точкой на поверхности литиевого устройства. Результаты теплового расчёта на примере вертикального лимитера представлены на Рисунке 6. Тепловой расчёт в условиях плазменного разряда проводился в предположении штатной работы токамака (омический режим без срывов), поэтому была проведена оценка теплового состояния устройств в режиме с релятивистскими электронами.

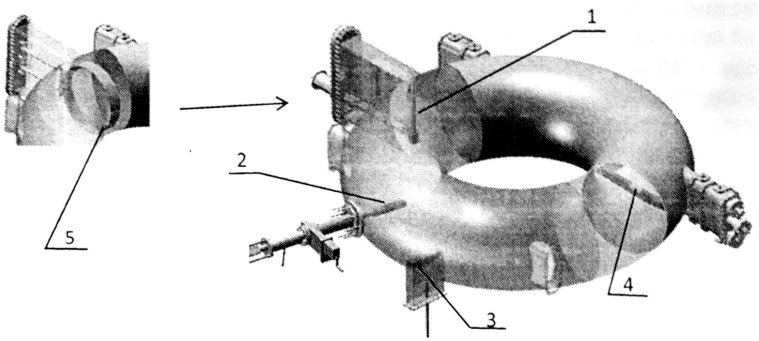


Рисунок 5. Внутрикамерные элементы токамака Т-11М: 1 – вертикальный лимитер, 2 – криогенная мишень, 3 – графитовый лимитер, 4 – продольный лимитер. 5 – кольцевой лимитер (располагается в антенном патрубке, заменяя вертикальный лимитер поз. 1)

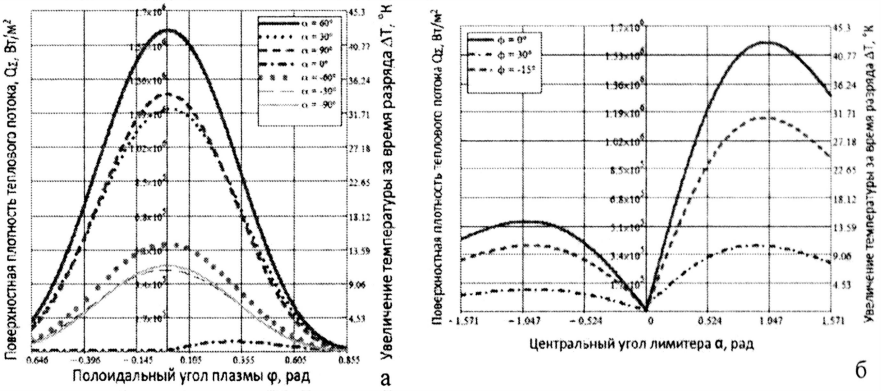


Рисунок 6. Результаты теплового расчёта вертикального лимитера: а – в зависимости от полоидального угла плазмы, б – от центрального угла лимитера

В заключительном разделе главы дан сравнительный анализ созданных устройств и выработаны конкретные рекомендации для их проектирования. Проанализировано влияние формы принимающей поверхности, соотношения величин тороидальных, полоидальных и радиальных тепловых потоков, материала принимающей поверхности лимитеров на тепловое состояние устройств. В результате анализа выявлено, что использование лития как переизлучателя, геометрическое профилирование принимающей поверхности и

оптимальный выбор материалов могут существенно снизить тепловую нагрузку на принимающую поверхность.

Четвёртая глава посвящена проделанной экспериментальной работе в сотрудничестве с коллективом АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» на токамаке Т-11М с разработанными литиевыми лимитерами и криогенной мишенью. Цель экспериментов — подтверждение, развитие и оптимизация концепции замкнутой литиевой петли на периферии плазменного шнура.

Для определения изменения эмиссии лития из литиевого лимитера в процессе работы стационарного термоядерного реактора токамак Т-11М был преобразован в стенд с долгоживущей плазмой тлеющего разряда на основе дейтерия. Выявлено, что эмиссия лития в процессе стационарных разрядов будет деградировать слабо, однако она очень чувствительна к воздействию остаточной атмосферы токамака.

Анализ миграции примесей в камере Т-11М показал, что примесные элементы (кроме примеси лития) не мигрируют и, поэтому, не будут искажать анализируемые процессы транспорта лития в литиевых экспериментах.

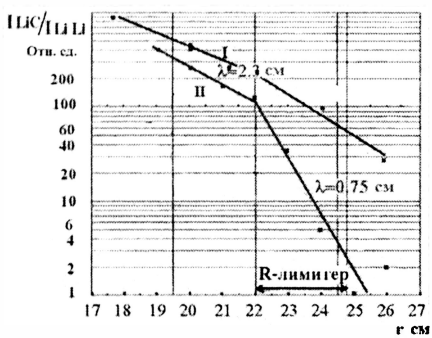


Рисунок 7. Радиальные распределения литиевых потоков с кольцевым коллектором (II) и без него (I)

Важную часть главы занимают эксперименты с кольцевым лимитером. В ходе исследования методом рекомбинационной мишени получено распределение лития с ним и без него (Рисунок 7), а также абсолютное количество лития, захваченного кольцевым лимитером и боковыми стенками горизонтального лимитера (120±10 мг и 100±10 мг соответственно за кампанию в 1000 разрядов). Доля лития, вовлечённого в циркуляционную петлю, составляет примерно 80 % от всего количества, литиевый поток на стенку камеры ≈ 10 % в случае обычной лимитерной геометрии и ≈ 1 % с кольцевым лимитером. Доказано, что основной сбор лития происходит именно с лимитера, а не со стенок токамака.

Для исследования вопросов транспортировки захваченного лития из коллектора в эмиттер были проведены эксперименты с вертикальным, продольным и горизонтальным лимитерами. Результаты выявили свойство мультипликативности коллекторов и влияние температуры лимитера на распределение лития (вследствие изменения эмиссионных свойств), также была получена оптимальная величина смещения коллектора относительно эмиттера (3…4 см) и проведён тест «бадминтонной» модели, в соответствие с которой транспортировка лития осуществляется в результате перемены эмиттерных и

коллекторных ролей литиевых устройств. Некоторые результаты исследований показаны на Рисунках 8 и 9.

В экспериментах с продольным лимитером была определена наиболее оптимальная схема стационарного термоядерного реактора на основе литиевых внутрикамерных устройств: в роли эмиттера выступает вертикальный лимитер, в роли коллектора — продольный. Эта схема будет использована в качестве прототипа для дальнейших исследований.

В заключительной части главы рассмотрены эксперименты с криогенной мишенью. Устройство предполагается использовать в целях очистки стенок вакуумной камеры без её разгерметизации от осевшего в процессе работы лития. Проведённые эксперименты подтвердили целесообразность метода и выявили характер влияния внешних факторов на эффективность процесса сбора.

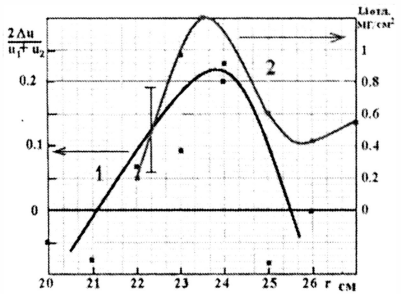


Рисунок 8. Распределение лития в тени вертикального литиевого лимитера (1) и количество осаждённого лития на боковых стенках горизонтального лимитера из ранних экспериментов (2)

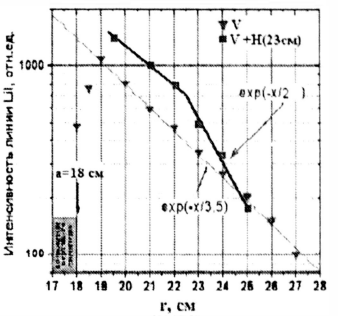


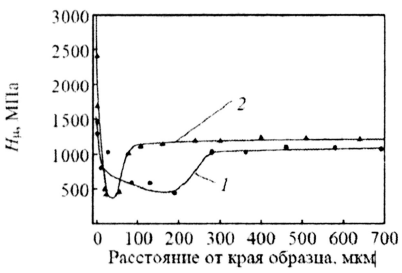
Рисунок 9. Распределение лития по малому радиусу в опытах с одиночным вертикальным и комбинацией вертикального (r=20 см) и горизонтального (r=23 см) литиевых лимитеров

В пятой главе рассмотрены коррозионная стойкость, структурные изменения и изменения механических свойств ванадиевых сплавов в литии и сплаве Na-K эвтектического состава.

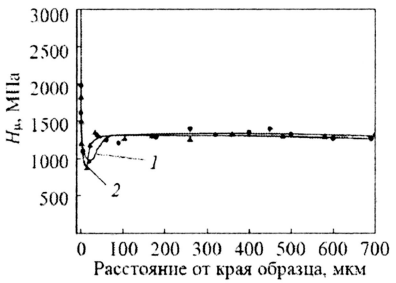
Испытания образцов из ванадия и ванадиевых сплавов (V – 1,86 Ga, V – 3,4 Ga – 0,62 Si и V – 4,8 Ti – 4,82 Cr) в очищенном литии показали, что превалирующим процессом, происходящим при взаимодействии исследуемых материалов с жидким литием, является диффузия атомов кислорода из приповерхностных слоёв образцов (от 10 до 100 мкм) в жидкий литий, что выражается в понижении микротвёрдости образца в этой зоне (Рисунок 10). В то же время поглощение азота и углерода ванадиевыми сплавами из лития достаточно мало, поэтому на их поверхности не образуется сплошной защитной оксинитридной плёнки, хотя эффект увеличения микротвёрдости в

приповерхностных слоях (до 10 мкм) присутствует. Механизмы коррозии для облучённых и необлучённых образцов идентичны. Коррозионное воздействие лития на морфологию поверхности выражается в проявлении границ зёрен (Рисунок 11). Гравиметрический анализ показал, что скорость убыли массы образцов варьируется от 6 до 16 мг/(м^2·ч). Таким образом, имеет место незначительное растворение материалов в литии.

Испытания образцов из ванадиевого сплава V – 4 Ti – 4 Cr в статичной среде сплава Na-K эвтектического состава показали высокую коррозионную стойкость (имели место незначительные изменения характеристик образцов после выдержки в коррозионно-активной среде), но полученный результат может быть следствием пониженного содержания кислорода в расплаве Na-K. Для проверки этой гипотезы были проведены испытания ванадиевого сплава V – 4 Ti – 4 Cr в конвективном потоке сплава Na-K с повышенным содержанием кислорода. На Рисунках 12 – 14 представлены результаты. Имеет место сильная зависимость скорости коррозии от температуры. Рентгеновский фазовый анализ поверхности образцов показал, что во всём температурном диапазоне испытаний на поверхности фиксируются оксиды ванадия VO, V_2O_3. Обнаружено, что в определенной подповерхностной зоне образцов имеет место образование оксида титана TiO. Оксидных фаз, содержащих хром, не зафиксировано. Таким образом, механизм коррозии сплава V – 4Ti – 4Cr в расплаве Na-K эвтектике связан с миграцией примесных атомов кислорода из расплава в сплав с образованием оксидов ванадия и титана.



а



б

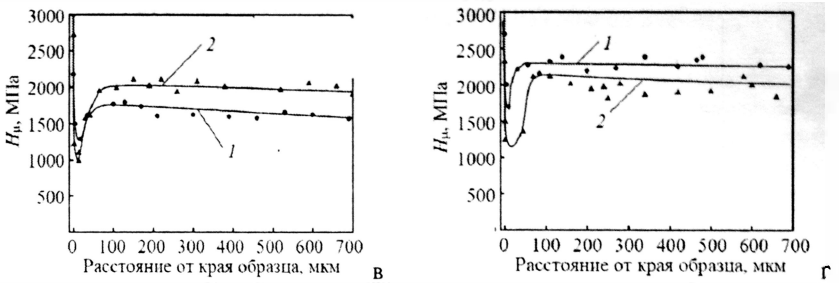


Рисунок 10. Распределение микротвёрдости по поперечному сечению исследуемых образцов после выдержки в Li (600°С, 400 ч): V (а); V – 1,86Ga (б); V – 3,4Ga – 0,62Si (в); V – 5Ti – 5Cr (г); 1 – необлучённые; 2 – облучённые

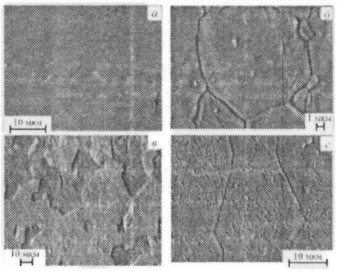


Рисунок 11. Топографии поверхности необлучённых (а, б) и предварительно облучённых аргоном (в, г) материалов до (а, в) и после (б, г) выдержки в Li (600°С, 400 ч)

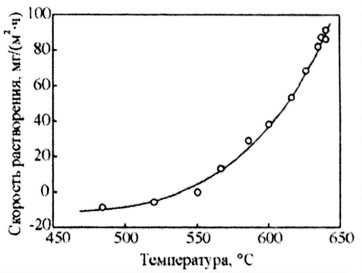


Рисунок 12. Зависимость скорости растворения образца от температуры

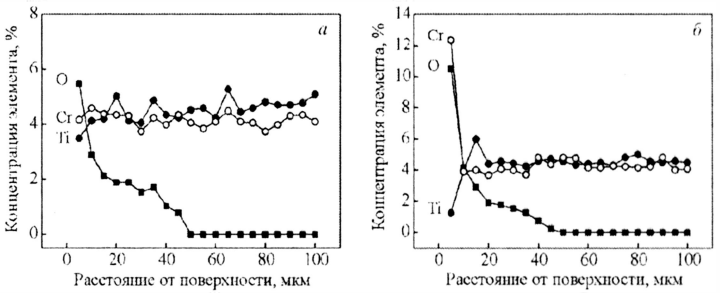


Рисунок 13. Распределение титана, хрома и кислорода по глубине образца после испытаний в Na-K эвтектики при температурах: 520°С (а) и 640°С (б)

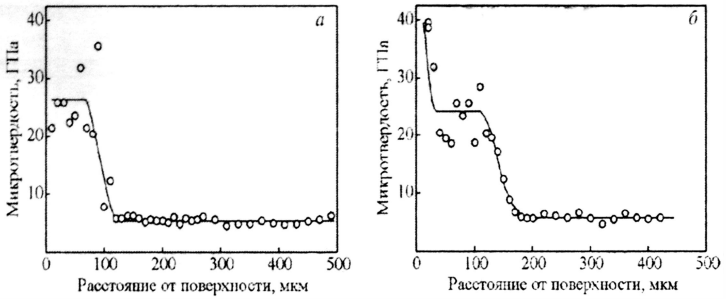


Рисунок 14. Распределение микротвердости по сечению образцов, прошедших испытания при температурах: 520°С (а) и 640°С (б), в конвекционном потоке эвтектики Na – K с исходным содержанием примеси кислорода $4 \cdot 10^{-2}$ %

Основные результаты диссертационного исследования

1. Создан ряд внутрикамерных элементов токамака Т-11М на основе литиевых капиллярно-пористых систем: кольцевой, вертикальный, продольный лимитеры и криогенная мишень. Аналитически и экспериментально показано, что устройства работоспособны в условиях данного токамака: температура поверхности литиевой КПС лежит в диапазоне рабочих температур от 180°С до 550°С, собирающей поверхности криогенной мишени лежит в области криогенных температур от -195°С до -180°С.

2. В опытах с кольцевым лимитером определено абсолютное количество собранного лития за экспериментальную кампанию в 1000 разрядов: 100±10 мг кольцевым лимитером и 120±10 мг боковыми стенками горизонтального рельсового лимитера, что соответствует расходу лития 1,1 мг/с. Дана оценка доле лития участвующего в процессе циркуляции (≈80 %). Полученные результаты свидетельствуют о чрезвычайной экономичности защиты внутрикамерных элементов с помощью переизлучения по сравнению, например, с методом текущей жидкометаллической плёнки, в котором расход вещества составляет ≈ 10...100 г/с. Выявлен двухэкспоненциальный характер распределения эмитированного лития в SOL токамака (λ_1=1 см, λ_2 = 0,75 см), что свидетельствует о непосредственном улавливании лития кольцевым лимитером.

3. Обнаружены эффекты мультипликативности коллекторов и влияния начальной температуры на распределение лития, выражающиеся в уменьшении характерной длины спада потоков с λ=3,5 см до λ=2,5 см при введении горизонтального лимитера в дополнение к вертикальному и до λ=2,2 см при понижении температуры вертикального лимитера с 230°С до 60°С. Данные эффекты позволяют изменять распределение лития в SOL токамака, изменяя число работающих лимитеров и их температуру. Показана принципиальная возможность создания замкнутой литиевой циркуляционной петли на основе

«бадминтонной» модели. Установлено, что оптимальное смещение коллектора относительно эмиттера составляет 3...4 см.

4. Выработана оптимальная схема защиты компонентов токамака стационарного действия от воздействия плазмы: в роли эмиттера — вертикальный лимитер, в роли коллектора – продольный (распределение лития двухэкспоненциальное с λ_1=1,5 см, λ_2 = 3,7 см). Уменьшение характерной длины спада потоков до λ_1=1 см, планируется осуществить с помощью ввода дополнительных коллекторов (используя эффект мультипликативности).

5. Решение технологических вопросов эвакуации лития, осаждённого на стенках разрядной камеры, продемонстрировано в опытах с криогенной мишенью. Показаны эффективность, технологичность этого метода и определён характер влияния внешних факторов. Максимальная скорость сбора лития составила 4,4 мг/ч в случае тлеющего разряда на азоте, что позволяет осуществить процесс очистки в течение 4 часов (обычный метод очистки без криогенной мишени занимает 1 месяц).

6. При исследовании коррозионной стойкости ванадия и сплавов на его основе (V – 1,86 Ga, V – 3,4 Ga – 0,62 Si и V – 4,8 Ti – 4,82 Cr) в жидком литии установлено, что превалирующим механизмом коррозионного процесса является диффузия кислорода из приповерхностных слоёв 10...100 мкм. Скорость убыли массы исследованных образцов, испытанных при 600°С в течение 400 ч, лежит в пределах от 6 до 16 мг/(м^2·ч), что свидетельствует о незначительном растворении материалов. Предварительное облучение ионами аргона не повлияло на коррозионную стойкость образцов.

При исследовании коррозионной стойкости сплава V–4Ti–4Cr в натрий-калиевом расплаве эвтектического состава установлено, что механизм коррозии связан с миграцией примесных атомов кислорода из жидкого расплава в сплав с последующим образованием оксидов ванадия и титана. При этом наблюдается нелинейный рост скорости растворения сплава V–4Ti–4Cr с ростом температуры; в частности, при увеличении температуры от 600°С до 650°С скорость растворения сплава увеличивается в 2,5 раза (от 40 мг/(м^2·ч) до 100 мг/(м^2·ч)). Для снижения коррозионной активности рекомендовано проводить их очистку от неметаллических примесей, в частности от кислорода (например, геттерированием), с использованием оптимального температурного режима.

Результаты, полученные при коррозионных испытаниях, позволяют рекомендовать к использованию ванадиевые сплавы в будущих внутрикамерных элементах термоядерных реакторов на основе лития с натрий-калиевым расплавом эвтектического состава в качестве теплоносителя.

По результатам диссертационного исследования получена справка о внедрении от АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», в соответствие с которой разработанные устройства установлены на токамак Т-11М и успешно испытаны, а результаты проведённых испытаний подтвердили принципиальную возможность достижения стационарных режимов токамака-реактора с внутрикамерными элементами на основе литиевых КПС.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Коррозионная стойкость сплавов V-Ga и V-Ti-Cr в литии / М.Ю. Жарков [и др.] // Перспективные материалы. 2014. № 5. С. 27–33. (0,44 п.л./ 0,06 п.л.).

2. Совместимость ванадиевых сплавов с расплавом натрий-калий эвтектического состава / М.Ю. Жарков [и др.] // Перспективные материалы. 2014. №7. С. 21–29. (0,56 п.л. / 0,08 п.л.).

3. Коррозионная стойкость сплава V – 4 Ti – 4 Cr в конвекционном потоке эвтектического сплава Na – K / М.Ю. Жарков [и др.] // Перспективные материалы. 2014. №11. С. 15–21. (0,44 п.л. / 0,06 п.л.).

4. Исследование коррозионной стойкости ванадиевых сплавов в жидком литии / М.Ю. Жарков [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. Вып. 1. С. 15–21. (0,44 п.л. / 0,05 п.л.).

5. Module of lithium divertorfor KTM tokamak / M. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering And Design. 2012. V. 87. Issue 10. P. 1719–1723. (0,31 п.л. / 0,03 п.л.).

6. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor for KTM tokamak / M. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2013. V. 88. Issues 9–10. P. 1862–1865. (0,25 п.л. / 0,02 п.л.).

7. Progress in development and application of lithium based components for Tokamak / M. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2014. V.89. Issues 7–8. P. 996–1002. (0,44 п.л. / 0,06 п.л.).

8. Tests of the cryogenic target for lithium and hydrogen isotopes extraction from the chamber of T-11M tokamak without its venting / M. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2014. V. 89. Issue 12. P. 2923–2929. (0,44 п.л. / 0,04 п.л.).

Цитируемая литература

1. Nunes I., de Vries P., Lomas P.J. Optimization of the JET beryllium tile profile for power oandling // Fusion Engineering and Design. V. 82, Issues 15-24. 2007. P. 1846-1853.