

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Национальный исследовательский университет  
"Высшая школа экономики"»

*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

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук



Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
профессор **Бондаренко Г.Г.**

Москва — 2015

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1.</b> Литературный обзор. Анализ перспектив использования лития в качестве материала для внутрикамерных элементов токамака.....	15
1.1. Материаловедческая проблема внутрикамерных элементов токамаков и предполагаемые методы её решения.....	15
1.2. Использование жидкого лития в качестве материала, контактирующего с плазмой. Литиевые капиллярно-пористые системы (КПС).....	17
1.3. Экспериментальное подтверждение целесообразности применения литиевых КПС в качестве материала, контактирующего с плазмой токамака.....	18
1.3.1. Исследования динамики эмиссии и распыления лития в условиях плазмы токамака.....	19
1.3.2. Исследования по удержанию дейтерия жидким литием.....	23
1.3.3. Исследования влияния лития на параметры плазмы.....	25
1.3.4. Концепция замкнутой литиевой петли в токамаке.....	32
1.4. Выводы по главе 1.....	37
<b>Глава 2.</b> Экспериментальные методы исследования.....	39
2.1. Токамак Т-11М. Описание экспериментальной установки.....	39
2.2. Подготовка литиевых КПС к экспериментам.....	42
2.3. Экспериментальные методы, используемые в экспериментах с литиевыми устройствами.....	42
2.4. Материалы на основе ванадия и их подготовка к экспериментам по исследованию коррозионного взаимодействия с литием и сплавом натрия с калием эвтектического состава.....	44
2.5. Экспериментальные методы определения коррозионной стойкости ванадиевых сплавов.....	46

	Стр.
2.6. Выводы по главе 2.....	48
<b>Глава 3. Внутрикамерные устройства токамаков на основе литиевых капиллярно-пористых систем.....</b>	<b>49</b>
3.1. Основные требования, предъявляемые к литиевым внутрикамерным устройствам.....	50
3.2. Вопросы выбора материала-основы КПС.....	52
3.3. Тепловое состояние литиевых лимитеров. Обобщённая методика теплового расчёта литиевых лимитеров.....	55
3.3.1. Методика расчёта начального теплового состояния лимитера	55
3.3.2. Методика расчёта теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой.....	58
3.5. Кольцевой лимитер Т-11М.....	64
3.5.1. Тепловой расчёт кольцевого лимитера.....	67
3.6. Вертикальный лимитер Т-11М.....	74
3.6.1. Тепловой расчёт вертикального лимитера.....	78
3.6.1.1. Расчёт начального теплового состояния лимитера.....	78
3.6.1.2. Расчёт теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой.....	80
3.7. Продольный лимитер Т-11М.....	88
3.7.1. Тепловой расчёт продольного лимитера.....	92
3.7.1.1. Расчёт начального теплового состояния лимитера.....	92
3.7.1.2. Расчёт теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой.....	94
3.8. Оценка работоспособности лимитеров при нештатных режимах токамака.....	104
3.9. Технологические аспекты реализации концепции замкнутой литиевой петли на стационарных токамаках. Создание собирающей криогенной мишени.....	105

	Стр.
3.9.1. Тепловой расчёт криомишени.....	108
3.10. Выводы по главе 3.....	110
<b>Глава 4. Исследование литиевых капиллярно-пористых систем как материала, непосредственно контактирующего с горячей плазмой токамака.....</b>	<b>116</b>
4.1. Исследование поведения эмиссии лития из литиевого лимитера под воздействием длительной бомбардировки дейтерием.....	117
4.1.1. Методика проведения эксперимента.....	117
4.1.2. Результаты тестовой кампании.....	117
4.2. Исследование захвата примесей литиевыми КПС в условиях токамака.....	119
4.2.1. Постановка эксперимента.....	119
4.2.2. Результаты химического анализа поверхности образца.....	121
4.3. Исследования транспортировки лития в экспериментах с кольцевым лимитером.....	124
4.3.1. Размещение лимитеров и методика проведения экспериментов	125
4.3.2. Определение циркуляционной части литиевого потока.....	125
4.3.3. Определение литиевого потока со стенки камеры в плазменный шнур.....	128
4.3.4. Определение азимутального распределения осаждённого лития на кольцевой лимитер.....	128
4.3.5. Основные результаты экспериментальной кампании.....	129
4.4. Исследование транспортировки лития в экспериментах с литиевыми вертикальным, горизонтальным и графитовым лимитерами	130
4.4.1. Размещение лимитеров, диагностических устройств в камере токамака Т-11М.....	131
4.4.2. Определение оптимального радиального смещения коллектора относительно эмиттера.....	132

4.4.3. Эксперименты по определению радиального распределения лития в SOL при использовании вертикального литиевого лимитера на токамаке T-11.....	135
4.4.4. Эксперименты с переменным использованием горизонтального и вертикального лимитеров в роли «эмиттера» и «коллектора».....	136
4.4.5. Результаты экспериментальной кампании.....	138
4.5. Первые эксперименты с продольным литиевым лимитером.....	141
4.5.1. Размещение лимитеров, диагностических устройств в камере токамака T-11M.....	141
4.5.2. Эксперименты по определению радиального распределения лития в SOL при использовании продольного и вертикального литиевых лимитеров на токамаке T-11M.....	141
4.5.3. Схема стационарного термоядерного реактора с использованием литиевых лимитеров.....	143
4.6. Эксперименты по сбору лития криогенной мишенью.....	145
4.6.1. Схема экспериментов.....	145
4.6.2. Эксперименты по определению эффективности сбора лития криогенной мишенью в зависимости от вакуумных условий.....	145
4.6.3. Исследование влияния температуры стенок разрядной камеры на эффективность сбора лития.....	149
4.6.4. Исследование влияния рабочего газа тлеющего разряда на эффективность сбора лития.....	150
4.6.5. Исследование влияния электрических и магнитных полей на эффективность сбора лития.....	152
4.6.6. Эксперименты с криогенной мишенью в режиме штатной работы токамака.....	153
4.6.7. Результаты экспериментальной кампании.....	155

	Стр.
4.7. Выводы по главе 4.....	156
<b>Глава 5. Исследование и внедрение новых перспективных конструкционных материалов для внутрикамерных литиевых устройств..</b>	<b>157</b>
5.1. Исследование коррозионного взаимодействия ванадия и ванадиевых сплавов с жидким литием.....	157
5.1.1. Постановка эксперимента.....	158
5.1.2. Результаты эксперимента.....	159
5.2. Исследование коррозионного взаимодействия ванадия и ванадиевого сплава V–4Ti–4Cr с эвтектическим расплавом Na-K.....	165
5.2.1. Постановка эксперимента.....	166
5.2.2. Результаты эксперимента.....	167
5.3. Исследование коррозионной стойкости сплава V–4Ti–4Cr в конвекционном потоке эвтектического сплава Na – K.....	169
5.3.1. Постановка эксперимента.....	169
5.3.2. Результаты эксперимента.....	172
5.4. Выводы по главе 5.....	176
<b>6. Общие выводы и результаты работы.....</b>	<b>177</b>
<b>Список использованной литературы.....</b>	<b>180</b>
<b>Приложение.....</b>	<b>189</b>

## Введение

### *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 углеволокнутого композита [1, 2]. 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 [3]. В связи с этим переход от ИТЭР к Демонстрационному термоядерному реактору (ДЕМО) в свете материаловедческой проблемы представляется затруднённым. Возможным решением этой задачи представляется использования лития в жидкой фазе совместно с капиллярно-пористыми системами (КПС) для стабилизации жидкой поверхности.

Эксперименты на токамаке T11-M 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. Она предполагает создание замкнутой петли циркуляции лития на границе плазменного шнура с предварительно нагретым (до 400 – 700°C) 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.

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. Основным недостатком 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. Продemonстрировано 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.

### ***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.

### ***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.

### ***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.).

### *Апробация работы в публикациях*

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

#### *В изданиях, рецензируемых ВАК РФ:*

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 divertor for 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.).

### ***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.*

## **Глава 1. Литературный обзор. Анализ перспектив использования лития в качестве материала для внутрикамерных элементов токамака**

### **1.1. Материаловедческая проблема внутрикамерных элементов токамаков и предполагаемые методы её решения**

В связи с истощением углеводородных энергетических ресурсов и увеличением энергопотребления в XXI веке остро встаёт вопрос о создании альтернативного источника, способного обеспечить человечество относительно дешёвой и чистой в экологическом отношении энергией. Одно из решений данной проблемы — управляемый термоядерный синтез (УТС) — удовлетворяет всем критериям такого альтернативного источника энергии. В процессе развития УТС было разработано множество устройств, однако самым оптимальным и перспективным на данный момент является токамак, предложенный Сахаровым А.Д. и Таммом И.Е. [4, 5]. Плазменный шнур в тороидальной камере токамака удерживается с помощью магнитного поля особой конфигурации: суперпозиция винтового магнитного поля от тока, текущего в плазме, и тороидального поля от тока внешних катушек токамака. Оптимальная температура плазмы, при которой максимален энергетический выход дейтерий-третиевой термоядерной реакции — 10 КэВ. Из этого следует, что для работы токамака необходимо термически изолировать разрядную стенку от горячей плазмы, но термоизоляция магнитным полем недостаточно эффективна: некоторая часть частиц за счёт диффузии поперёк магнитного поля и во время срывов всё же достигает поверхности камеры, к тому же удержание магнитным полем совершенно неприменимо к переносу энергии излучением и нейтральными частицами. Для решения этой проблемы на ранних токамаках было предложено специальное устройство — лимитер, на более поздних — дивертор. Основные задачи этих устройств — термоизоляция стенки камеры токамака и предотвращение диффузии примесей в центр плазменного шнура.

В работе [6] показано, что тепловой поток на лимитер и дивертор в токамаке может достигать  $20...50 \text{ МВт/м}^2$ . В связи с этим возникает проблема выбора материалов для этих устройств. Перечислим некоторые требования к ним:

- долговечность или возобновляемость;
- отсутствие потоков элементов с высоким  $Z$  в плазму;
- радиационная и термическая стойкость.

Разработанная на сегодняшний день конструкция дивертора ИТЭР, верх материаловедческих и инженерных технологий, очень слабо решает проблему снятия теплового потока. Для реактора ДЕМО, где условия работы намного жёстче, проблема внутрикамерных элементов не решена. В целом, материалов, способных выдержать такие нагрузки в природе не существует [7 – 11]. В работе [12] были предложены такие решения поставленной задачи:

- организация быстро текущих по охлаждаемой подложке жидкометаллических пленок;
- создание, завесы сплошным потоком жидкого металла;
- создание капельной жидкометаллической завесы;
- создание завесы из падающих твердых шаров;
- размещение в диверторе вращающихся цилиндров.

На первый взгляд, все предложения очень просты, однако на практике они труднореализуемы. Все идеи жидкометаллического дивертора в работе [12] сводятся либо к охлаждению твёрдой подложки жидким металлом, либо созданию капельной завесы, воспринимающей тепловой поток из плазмы. В первом случае имеет место ограничение по тепловой нагрузке (до  $5 \text{ МВт/м}^2$ ), во втором случае, как показали эксперименты на токамаке Т-3М [13], имеет место нестабильность системы в условиях магнитного поля.

В работах [14, 15] рассмотрен вариант приёмной диверторной поверхности в виде текущей плёнки жидкого галлия (скорость потока  $V=10 \text{ м/с}$ , толщина плёнки  $2 - 8 \text{ мм}$ ). Анализ этого варианта [16] показывает, что галлий



при благоприятных условиях не может воспринимать удельную мощность выше  $15 - 20 \text{ МВт/м}^2$  в силу высокого  $Z$ .

## **1.2. Использование жидкого лития в качестве материала, контактирующего с плазмой. Литиевые капиллярно-пористые системы (КПС)**

Следующим этапом в развитии жидкометаллического внутрикамерного элемента стала концепция лимитера (дивертора) на основе лития, как металла с наименьшим зарядовым числом [17,18]. Одной из простейших схем реализации этой концепции является дивертор (лимитер), в котором передача тепла от плазмы к стенке осуществляется за счёт переизлучения ионами и нейтральными атомами лития. Основным фактором, определяющим эффективность схемы, является концентрация ионов в периферийной области плазменного шнура, которая в свою очередь зависит от величины эмиссии лития и времени его жизни в плазме. К тому же следует учитывать, что литий является плохим переизлучателем из-за малого  $Z$ . Исправить этот недостаток можно двумя путями: введением примеси с более высоким  $Z$ , либо переводом лития в сильно нестационарное ионизационное состояние, когда литий переходит из одного ионизационного состояния в другое. Из-за опасности проникновения примеси с высоким  $Z$  в центр плазменного шнура более предпочтителен второй вариант.

Применение жидкого металла (лития) в условиях токамака имеет много потенциальных достоинств [19], однако возникают и технологические проблемы, а именно:

- неустойчивость поверхности жидкого металла из-за МГД эффектов;
- аномальное распыление поверхности жидкого металла ионами плазмы;
- снятие тепловых нагрузок и термическая стабилизация поверхности для предотвращения сильного испарения лития;
- осаждение лития на поверхности вакуумной камеры;

- накопление трития и дейтерия в жидком литии и их извлечение из лития;
- влияние примеси лития на параметры плазмы.

В целях компенсации пондеромоторных сил, возникающих во время разряда, было предложено использование литиевых капиллярно-пористых систем (КПС) — принципиально нового материала, в котором жидкий литий заключён в матрицу из пористого материала и удерживается силами поверхностного натяжения (Рисунок 1.1) [17, 18].

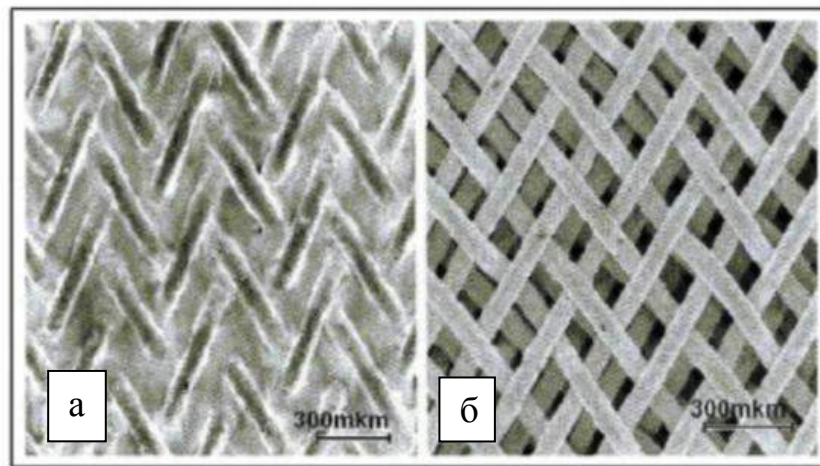


Рисунок 1.1. КПС с (а) и без (б) заполнения литием

### **1.3. Экспериментальное подтверждение целесообразности применения литиевых КПС в качестве материала, контактирующего с плазмой токамака**

Экспериментальное подтверждение оценок работоспособности литиевых КПС было проведено при испытаниях моделей внутрикамерных элементов токамака. Моделирование условий проводилось облучением литиевых КПС электронным пучком с удельной плотностью падающего потока энергии до  $50 \text{ МВт/м}^2$  [20 – 25]. Полученные результаты показали, что литиевые КПС с ограниченным запасом лития и отсутствием активного охлаждения способны воспринимать тепловую нагрузку до  $50 \text{ МВт/м}^2$ , что позволяет использовать их в термоядерном реакторе.

Отдельным вопросом стоит совместимость литиевых КПС с плазмой токамака. Под термином «совместимость» здесь подразумевается отсутствие каналов аномальной эрозии лития. Причины такой эрозии могут быть:

- разность электрических потенциалов плазма-стенка и, как следствие этого, развитие униполярных дуг или локальных "взрывов" поверхности;
- процессы ионного распыления лития;
- микрокапиллярные волны вблизи границы жидкий металл-плазма.

### **1.3.1. Исследования динамики эмиссии и распыления лития в условиях плазмы токамака**

Динамика эмиссии лития с поверхности КПС во время разряда наблюдалась в экспериментах на токамаке T-11M с лимитером на основе КПС [26]. Результаты показали, что при взаимодействии лития с D- и He-плазмой токамака аномальная эрозия жидкого лития отсутствовала. Для температур  $T < 500^{\circ}\text{C}$  эмиссия лития соответствует его распылению ионами дейтерия и лития, а при  $T > 500^{\circ}\text{C}$  на первое место выходит испарение лития с поверхности. Также в результате экспериментов удалось подтвердить работоспособность КПС как стабилизатора поверхности жидкого металла.

Ранее, на установке PISCES-B, были произведены измерения распыления поверхности жидкого лития ионами дейтерия [27]. Эта установка предназначена для моделирования взаимодействия горячей плазмы термоядерного реактора с внутрикамерными элементами реактора и, по сути, представляет собой имитатор пристеночной плазмы. Схема установки показана на Рисунке 1.2.

Установка позволяет получать стационарный плазменный поток в течение длительного времени (порядка нескольких часов). Основные характеристики установки даны в Таблице 1.

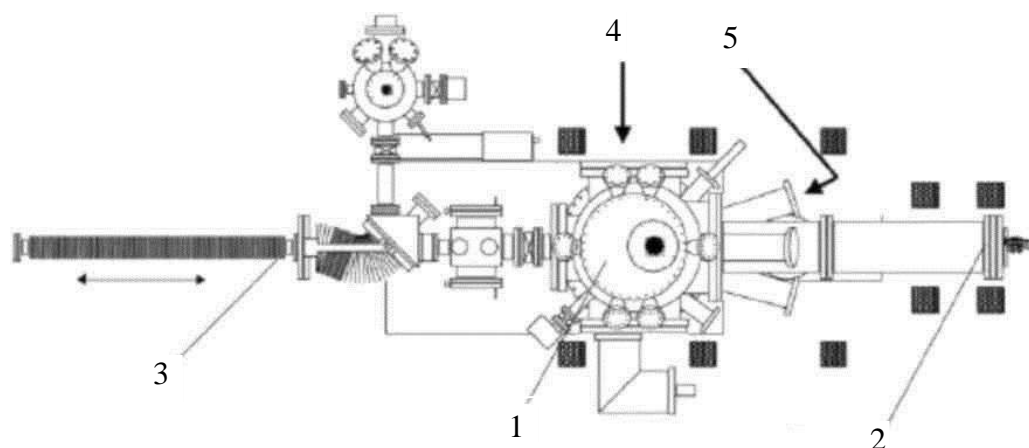


Рисунок 1.2. Схема установки PISCES-B: 1 – камера мишени, 2 – источник плазмы, 3 – ввод образца, 4 – выход для спектроскопии (аксиальный режим), 5 – выход для спектроскопии (доплеровский режим)

Таблица 1.

Основные характеристики установки PISCES-B

Характеристика	Значение
Диаметр плазменного столба, см	6
Остаточное давление системы, тор	$2 \cdot 10^{-8}$
Температура электронной компоненты плазмы, эВ	5...40
Концентрация электронов, $\text{см}^{-3}$	$10^{11} \dots 10^{13}$
Энергия ионов, кэВ	до 2...3
Рабочее вещество	Гелий, дейтерий
Термометрирование	Термопара, ИК-пирометр

Образец, который представляет собой молибденовую чашу, установлен вертикально на конце ввода и удерживается им в центре столба плазмы так, что силовые линии магнитного поля перпендикулярны поверхности. Параметры плазмы у образца могут варьироваться изменением напряжения на катоде и скоростью напуска газа. Испытуемый образец лития представляет собой цилиндр толщиной 2 мм и диаметром 1 см, расположенный на дне

молибденовой чаши. Температура образца может регулироваться с помощью подачи хладагента к чаше через ввод. Термометрирование в данном эксперименте осуществлялось с помощью термопары.

Величина эрозии лития измерялась спектрометрическими методами, исходя из линейчатого излучения нейтральных атомов лития (670,7 нм) в плазме. В процессе распыления играют роль два вида частиц — нейтральные атомы и ионы, но так как на образец относительно плазмы подан отрицательный потенциал, то вклад в распыление будут вносить только нейтральные атомы.

На установке доступны два режима измерений: аксиальный и доплеровский. Первый режим измеряет параллельно поверхности на разных расстояниях от неё. С помощью этого режима можно напрямую измерить количество нейтральных атомов, покинувших поверхность образца. Второй, доплеровский режим, позволяет проводить измерения перпендикулярно поверхности образца (т. е. вдоль магнитного поля). С помощью этого метода определяется доплеровское смещение линии, следовательно, этот метод позволяет определить скорость частиц покидающих образец.

Согласно теоретическим представлениям ожидалось, что при  $T < T_{пл}$  скорость распыления — постоянная величина, при  $T = T_{пл}$  — происходит скачок, связанный с уменьшением энергии связи на поверхности. При дальнейшем увеличении температуры скорость распыления растёт, но в то же время растёт и скорость испарения. Наконец, при высоких температурах механизм испарения становится определяющим, и зависимость уноса материала от величины падающих ионов исчезает.

На Рисунке 1.3а показаны результаты измерений скорости распыления образца под действием двух различных потоков гелиевой плазмы ( $E_i = 175$  эВ). При  $T \leq T_{пл}$  отклонений от ожидаемой зависимости не наблюдается, но при увеличении температуры жидкого лития, скорость распыления начинает расти экспоненциально при температуре намного меньше ожидаемой. Кроме того, при высоких температурах сохраняется зависимость скорости потерь от потока.

Это означает, что механизм, отвечающий за повышение потерь от распыления, связан с каждым ионом, приходящим на поверхность (Рисунок 1.3б).

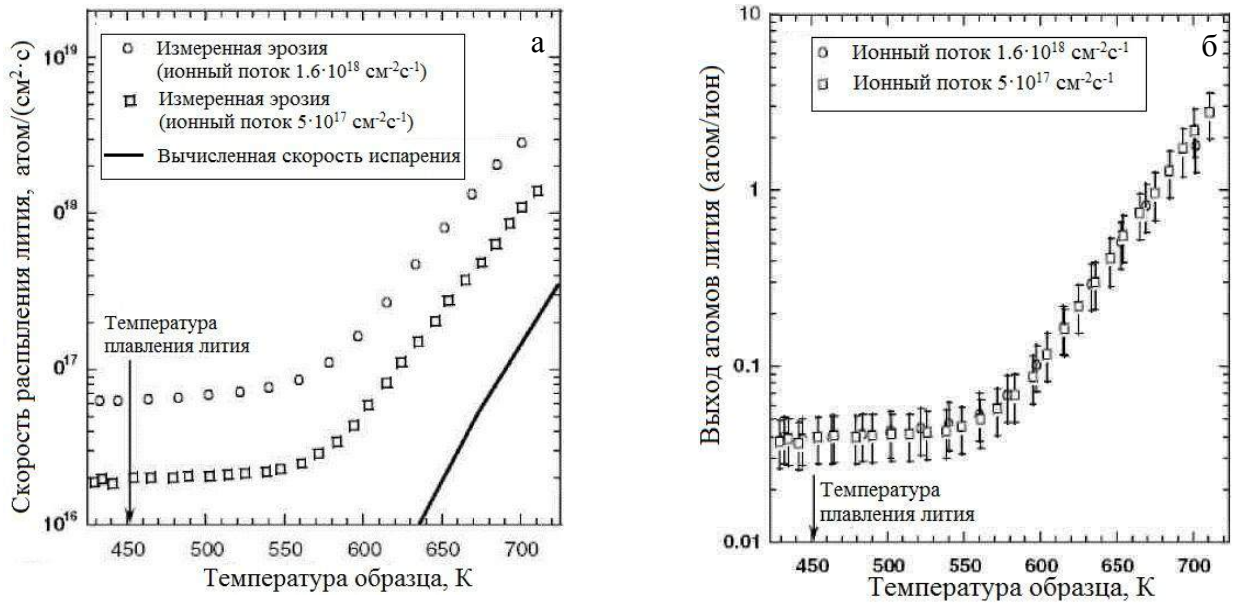


Рисунок 1.3. Скорость распыления (а) и выход атомов (б) из литиевого образца при бомбардировке ионами с энергией 175эВ

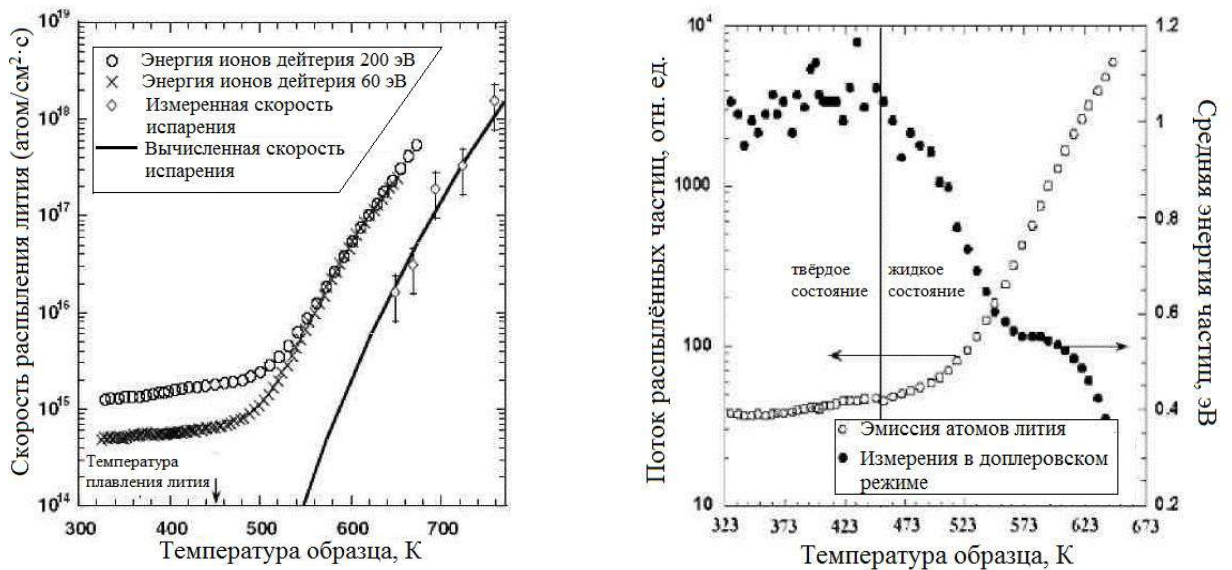


Рисунок 1.4. Скорость распыления литиевого образца при бомбардировке ионами дейтерия

Рисунок 1.5. Средняя энергия атомов покинувших поверхность образца

На Рисунке 1.4 представлены измерения, проведенные для дейтериевой плазмы, в этом случае величина потока оставалась постоянной, а энергия ионов варьировалась. Полученные результаты показывают, что отличия экспериментальной зависимости от теоретической не являются следствием величины энергии падающих ионов или разницы температур между поверхностью и контактом термопар. Также на Рисунке 1.4 представлены измерения, проведенные с одним из образцов лития при помощи кварцевого кристаллического осциллятора в отсутствие плазмы. Полученные данные согласуются со значением величины испарения, что означает, что образец полностью чист, и поверхностные примеси не могут вызвать этот эффект.

На Рисунке 1.5 даны результаты исследований с помощью доплеровского режима работы спектрографа. Видно уменьшение энергии частиц, уходящих с поверхности. Это означает, что при увеличении температуры поверхность покидают всё большие фракции частиц.

### **1.3.2. Исследования по удержанию дейтерия жидким литием**

Одно из преимуществ лития, а именно высокая поглощательная способность по отношению к газам и продуктам эрозии первой стенки, может стать серьёзным недостатком в свете проблемы захвата дейтерия литием. В работах [28, 29] проведены исследования по удержанию дейтерия жидким литием. Эксперименты проводились на установке PISCES-B. Результаты представлены на Рисунке 1.6. В ходе эксперимента литиевые образцы (в жидкой и твёрдой фазе) облучались потоком ионов дейтерия с последующим фиксированием величины поглощённого дейтерия при помощи ТДС. Облучение проводилось при разных температурах: 323°K для твёрдой фазы и 523°K, 573°K, 623°K, 673°K для жидкой фазы. На Рисунке 1.6 разным температурам соответствуют разные обозначения точек. Также на Рисунке 1.6 изображены три линии: первая, штриховая, показывает содержание атомов лития в образце, вторая, сплошная, соответствует полному поглощению ионов

дейтерия, третья, пунктирная, показывает поток всех частиц из образца (сумма измеренного потока ионов и вычисленного потока нейтральных атомов). Результаты эксперимента показывают, что имеет место полное удержание ионов, упавших на поверхность жидкого образца. Как видно из Рисунка 1.6, при увеличении величины потока падающих ионов дейтерия до некоторой величины полное удержание продолжается, а после этой величины литиевый образец переходит в форму дейтерида лития (литиевый образец насыщается дейтерием в отношении 1:1). После насыщения образца резко увеличиваются рециркуляционные способности. Как было сказано выше, жидкие образцы исследовались при разных температурах (от 523°K до 673°K), однако никакой зависимости поглощения дейтерия от температуры не наблюдается. Для твёрдого лития картина иная: полного растворения дейтерия не обнаружилось. Полагается, что это результат низкой диффузии водорода в твёрдом литии, то есть насыщается лишь поверхность образца.

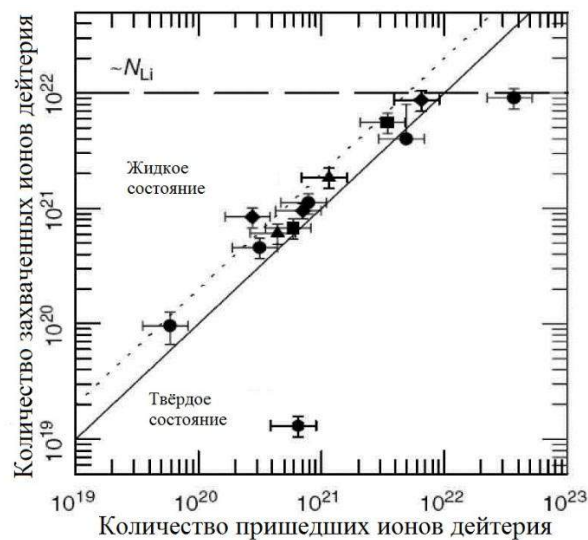


Рисунок 1.6. Зависимость поглощения дейтерия от потока приходящих ионов

На Рисунке 1.6 виден один интересный эффект: количество поглощённых частиц всегда больше количества приходящих частиц, то есть экспериментальные точки располагаются всегда выше сплошной линии. Это объясняется тем, что из плазмы приходит также поток нейтральных атомов (от



перезарядки). Теоретические оценки потока нейтральных атомов выражаются на Рисунке 1.6 пунктирной линией. Таким образом, в эксперименте имеет место абсорбция нейтральных атомов жидким литием.

Эксперименты по поглощению дейтерия проводились и на токамаке T-11M [26, 30]. Результаты показали, что в условиях малого токамака происходит сорбция дейтерия и гелия, но при нагреве первой стенки до 50 – 100°C сорбция гелия снижается, а до 300 – 350°C — снижается сорбция дейтерия. Разложение дейтерида лития происходит при температуре около 700°C, поэтому можно предположить, что основная доля дейтерия заключена в литии не в форме дейтерида, а просто растворена в нём. Захваченный дейтерий относительно просто извлечь, нагревая литий до 400 – 450°C в специальном объёме. Извлечение лития и дейтерия со стенок камеры после завершения экспериментальной кампании осуществляется путём обработки стенок реактора водой с последующей рекуперацией химическим путём. В диссертации будет предложен способ удаления плёнок лития без разгерметизации вакуумной камеры токамака.

### **1.3.3. Исследования влияния лития на параметры плазмы**

Первые исследования влияния лития на параметры плазмы проводились на токамаке TFTR [31]. В результате экспериментов было подтверждено отсутствие накопления лития в центре плазмы. Взаимодействие литиевого лимитера на основе КПС с плазмой токамака было впервые рассмотрено на токамаке T-11M [32]. Параллельно с опытами на T-11M проводились эксперименты на итальянском токамаке FTU [33]. Рассмотрим кратко основные результаты этих экспериментов.

Характеристики токамака T-11M, система диагностики, а также методика экспериментов с литиевыми лимитерами будут подробно описаны в главе 2. Конструкция литиевого лимитера, использующегося в экспериментах на токамаке T-11M показан на Рисунке 1.7.

При температуре лития от 20 до 600°C не наблюдалось никаких аномальных "выбросов" лития в плазму разряда. В процессе нагрева литиевого лимитера в излучении пристеночной плазмы стали появляться линии лития (670,8 нм). На Рисунке 1.8 изображены развитие во времени интегральной интенсивности излучения для трех начальных температур и тока плазмы. Эти результаты подтверждают прямую зависимость эмиссии лития от температуры лимитера.

В данном эксперименте были проведены исследования по распылению лития и удержанию дейтерия о чём было сказано выше. Кроме того, ставился специальный эксперимент [34] для выявления поведения лития в условиях срывов разряда. Результаты показали переизлучение приповерхностным слоем лимитера подавляющей части приходящего теплового потока. После 200 выстрелов со срывами твёрдая база КПС не претерпела каких-либо разрушений.

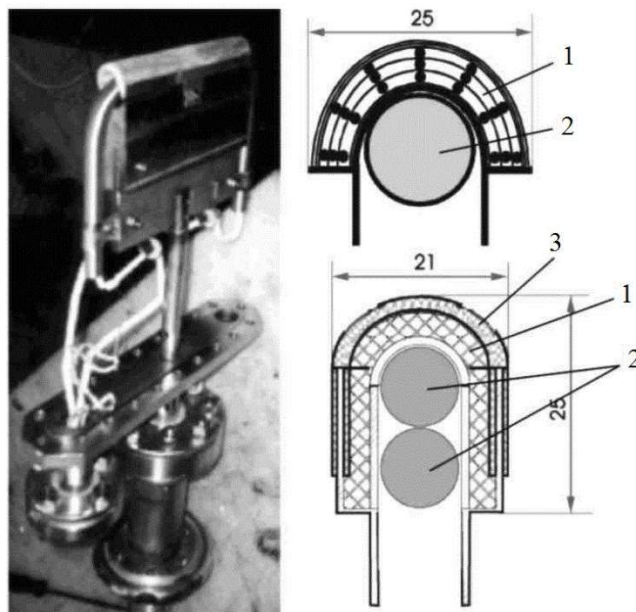


Рисунок 1.7. Литиевый лимитер: (а) общий вид; (б) КПС литиевый лимитер (в разрезе): 1 – КПС слой с порами радиусом 100 мкм, 2 – нагреватель лимитера; 3 – КПС слой с порами радиусом 30 мкм. Все размеры – в миллиметрах

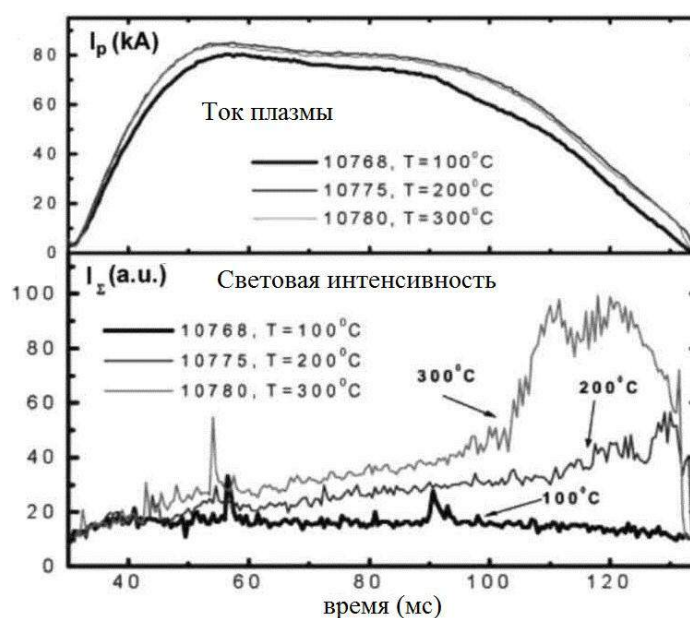


Рисунок 1.8. Временная зависимость полной световой интенсивности и тока плазмы для различных начальных температур (100 – 300 °С)

Эксперименты с литиевым лимитером на основе КПС проводились и на токамаке с высоким магнитным полем (токамак FTU) [34]. Параметры токамака FTU приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Параметры токамака FTU

Параметр	Значение
Главный радиус, м	0,93
Малый радиус, м	0,30
Магнитное поле, Тл	< 8
Ток разряда, МА	< 1,6
Длительность разряда, с	1,5

Изготовленный литиевый лимитер для токамака FTU представляет собой три отдельных модуля. Каждый модуль представляет собой молибденовый теплоаккумулятор, обтянутый слоем КПС из нержавеющей стали с эффективным радиусом пор 15 мкм. Запас лития находится в резервуаре,

расположенного в нижней части модуля. КПС имеет гидравлический контакт с запасом лития.

Посредством сил поверхностного натяжения он поступает на поверхность, контактирующую с плазмой. Систему диагностики лимитера представляют термодары и зонды Ленгмюра. Температура поверхности лимитера измеряется с помощью ИК-детекторов. Присутствие лития в плазме контролируется методами спектроскопии (по интенсивности третьей линии лития  $\lambda=13,5$  нм). Фотография литиевого лимитера представлена на Рисунке 1.9.



Рисунок 1.9. Фотография литиевого лимитера токамака FTU

Лимитер был предварительно нагрет в специальной камере до температуры  $220^{\circ}\text{C}$  а затем введён в камеру в тени тороидального лимитера через вертикальный вакуумный ввод. Положение лимитера относительно плазмы можно менять от выстрела к выстрелу.

На Рисунке 1.10 сравнены два подобных омических разряда, один после литиизации, другой после боронизации: в разряде после литиизации доля излученной мощности из плазмы уменьшена на 50 %,  $V_{loop}$  уменьшен на  $\sim 10$  % из-за более низких значений эффективного заряда иона ( $Z_{эфф}$ ). Электронная температура  $T_e$  также уменьшается, вследствие уменьшения мощности. В течение почти всей экспериментальной кампании, включающей

приблизительно 200 плазменных разрядов с параметрами  $B_T = 6$  Тл,  $I_p = 0,5 - 0,9$  МА и средней электронной плотности  $n_e$  от 0,15 до  $2,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , значение  $Z_{\text{эфф}}$  в основном держится ниже 2,0, изменяясь от 1,5 при низкой плотности ( $n_e = 0,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ) до 1,0 при более высокой плотности ( $\geq 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ) как показано на Рисунке 1.11. Также было проведено сравнение параметров разрядов после литиизации и боронизации с параметрами разряда с чистыми металлическими стенками. Показано увеличение времени удержания в 1,3 раза, но в то же время коэффициент переноса для электронов  $\chi_e$  уменьшается, но не так значительно. Эти результаты показывают, что причина увеличения времени удержания — сильное уменьшение омической мощности в разрядах с литиизацией и боронизацией, вследствие более низкого эффективного заряда иона,  $Z_{\text{эфф}}$ . Это объясняется тем, что омическая мощность и потери на излучение, которые главным образом вносят вклад при вычислении  $\chi_e$ , зависят от  $Z_{\text{эфф}}$ .

В большинстве случаев на токамаке FTU предусмотрены режимы с плотностями, превышающими предел Гринвальда. После литиизации разряды выше этого предела были без затруднений получены в диапазоне разрядного тока  $I_p = 0,5 \dots 0,9$  МА. Для  $I_p = 0,5$  МА,  $B_T = 6$  Тл предельная плотность ( $2,7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ) в 1,7 раза выше, чем в разрядах после свежей боронизации и в 1,4 раза выше соответствующего предела Гринвальда.

С введением литиевого лимитера внутрь вакуумной камеры (#28510)  $n_e$  выросло до  $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  ( $\sim n_{\text{GW}}$ ), что в два раза больше значения в разряде без лимитера (#28508), и не изменялось приблизительно в течение 0,4 с. В начале фазы высокой плотности выстрела #28510 количество дейтерия слегка уменьшилось и осталось низким, указывая на сильно уменьшенную рециркуляцию частиц дейтерия, тогда как в выстреле #28508 количество дейтерия осталось высоким. Пиковая плотность повысилась с  $f_{\text{pk}} \sim 1,5$  в выстреле #28508 до  $f_{\text{pk}} > 2$  в выстреле #28510. Это весьма высокое значение для  $n_e$ . Такой профиль электронной плотности, дает основание говорить, что был достигнут новый режим работы токамака, длящийся почти 0,5 с. Его завершение происходит из-за изменения SOL: выработка лития и радиационные потери в

SOL недостаточны, чтобы поддержать этот режим вследствие уменьшенного взаимодействия литиевого лимитера с плазмой. Все описанные параметры плазменного разряда представлены на Рисунке 1.12.

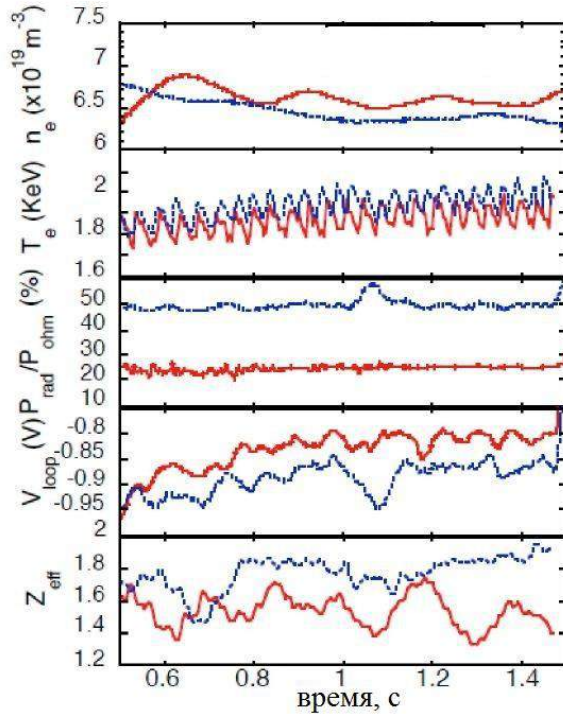


Рисунок 1.10. Сравнение параметров разрядов после литизации (—) и боронизации (—). Сверху вниз: концентрация электронов ( $n_e$ ), температура электронов ( $T_e$ ), отношение излучённой мощности к омической ( $P_{\text{rad}}/P_{\text{ohm}}$ ), объём петли ( $V_{\text{loop}}$ ), эффективный заряд ( $Z_{\text{эфф}}$ )

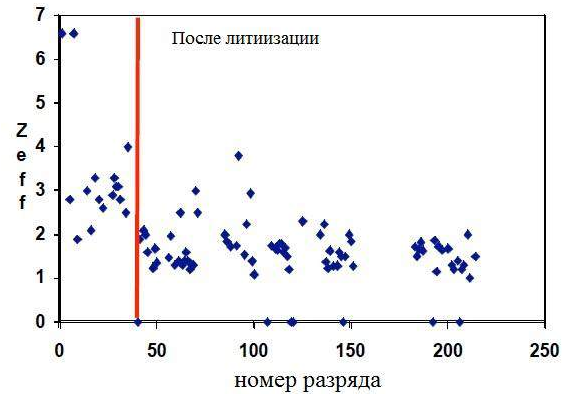


Рисунок 1.11. Зависимость  $Z_{\text{эфф}}$  от полного числа выстрелов в течение экспериментальной кампании. Вертикальная линия разделяет выстрелы до и после литиизации

В течение работы, несмотря на высокие тепловые потоки, приходящие на лимитер ( $\sim 5 \text{ МВт/м}^2$ ), температура литиевой поверхности не превышала  $250^\circ\text{C}$ . Аномальных выбросов лития с поверхности зафиксировано не было даже во время срывов. Значительных повреждений основы КПС замечено тоже не было.

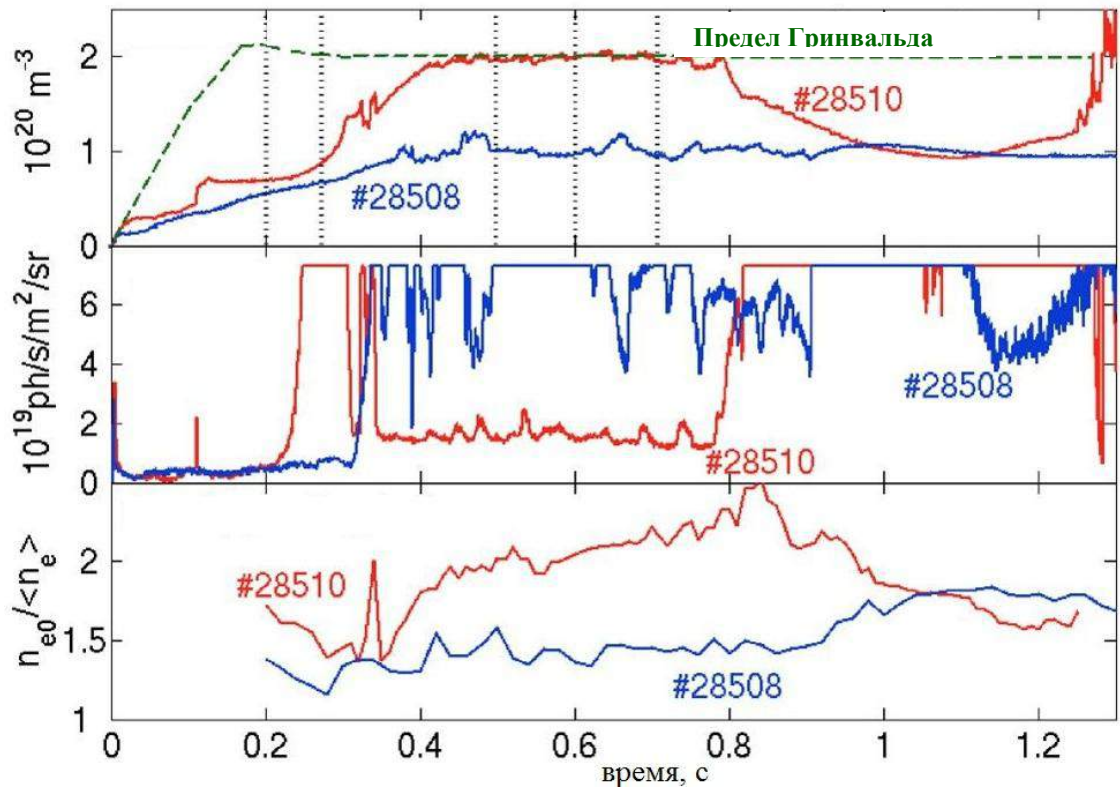


Рисунок 1.12. Параметры плазменных разрядов в зависимости от времени. Сверху вниз: плотность электронов ( $n_e$ ), интенсивность линии  $D_\alpha$  и фактор неравномерности электронной плотности ( $f_{pk}=n_{e0}/\langle n_e \rangle$ ). Выстрел #28510 — лимитер введён в плазму, #28508 — вне плазмы

Результаты экспериментов на токамаке FTU подтвердили преимущества лития как материала для внутрикамерных элементов. Литизация первой стенки дает результаты, превосходящие даже боронизацию [35], однако эффект литизации сохраняется намного дольше. Рециркуляция дейтерия сильно уменьшается. Достигнут новый режим протекания разряда, при котором имеет место низкий поток частиц из плазмы и «пиковый» профиль плотности, близкий к пределу Гринвальда. КПС с жидким литием выдерживают большие тепловые нагрузки без аномального разбрызгивания лития.



### 1.3.4. Концепция замкнутой литиевой петли в токамаке

Как показали эксперименты на токамаке T11-M [36] эффективным механизмом охлаждения периферии плазмы, а, следовательно, и защиты контактирующих с плазмой поверхностей в условиях квазистационарного разряда, может служить некорональное излучение атомов лития. Эффект объясняется постоянно циркулирующими между плазмой и защищаемой поверхностью ионами лития и позволяет рассеять почти 80% всей энергии омического нагрева на стенки вакуумной камеры посредством ультрафиолетового излучения. Эффект «экранирования» может послужить основой концепции замкнутой литиевой петли в стационарно работающих токамаках с литиевыми эмиттером и коллектором. Физический принцип эффекта на данный момент до конца не ясен. Предполагается, что он может быть результатом большого энергетического промежутка между низким первым (5,8 эВ) и высоким вторым (75 эВ) потенциалами ионизации лития. В результате ионы лития в SOL ( $T_e = 10 - 30$  эВ) будут находиться в состоянии первичной ионизации и трение между ними и основными ионами плазмы (основной механизм аккумуляции ионов с высоким  $Z$  в ядре плазмы) будет низким. Кроме того, известно, что продукты литиевой эрозии составляют главным образом ионы лития, которые должны накапливаться на периферии плазмы.

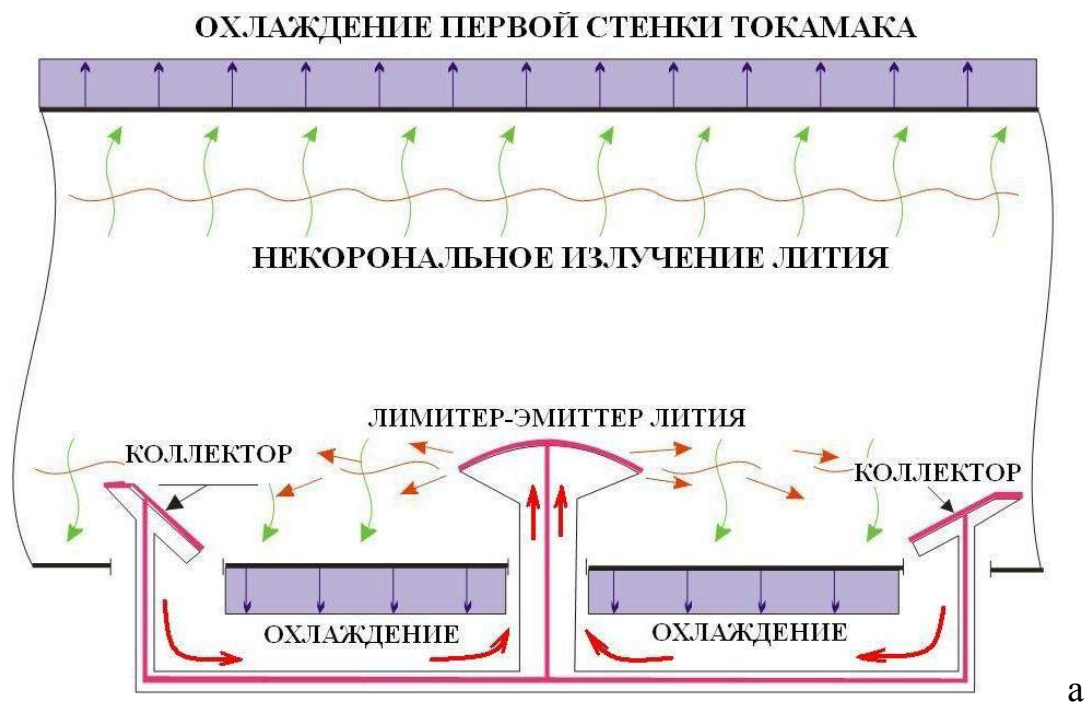
Концепция литиевого эмиттера-коллектора (Рисунок 1.13а) предполагает создание замкнутой петли циркуляции лития на границе плазменного шнура с предварительно нагретым (до 400 – 700°C) лимитером, выступающим в роли эмиттера, и вторым более холодным лимитером в его тени — литиевый коллектор. Литиевый эмиттер может работать не только как главный лимитер токамака, но и как второй лимитер, расположенный в тени главного лимитера или в диверторном SOL. Если имеется несколько идентичных литиевых лимитеров в камере токамака, то можно менять их эмиттерные и коллекторные роли (так называемая бадминтонная модель, Рисунок 1.13б) периодическим



изменением их относительных положений или с помощью локальных магнитных возмущений [37]. Литиевый коллектор должен быть расположен в холодной области, в тени эмиттера. В таком случае литиевая циркуляционная петля будет охлаждать периферию плазмы, и защищать поверхность, контактирующую с ней.

Концепция литиевой замкнутой петли подразумевает четыре характерных этапа:

- 1) эмиссия лития в плазму;
- 2) охлаждение границ плазмы некорональным излучением литиевых ионов;
- 3) захват литиевых ионов коллектором перед их осаждением на стенки вакуумной камеры;
- 4) транспортировка лития из коллектора в эмиттер.



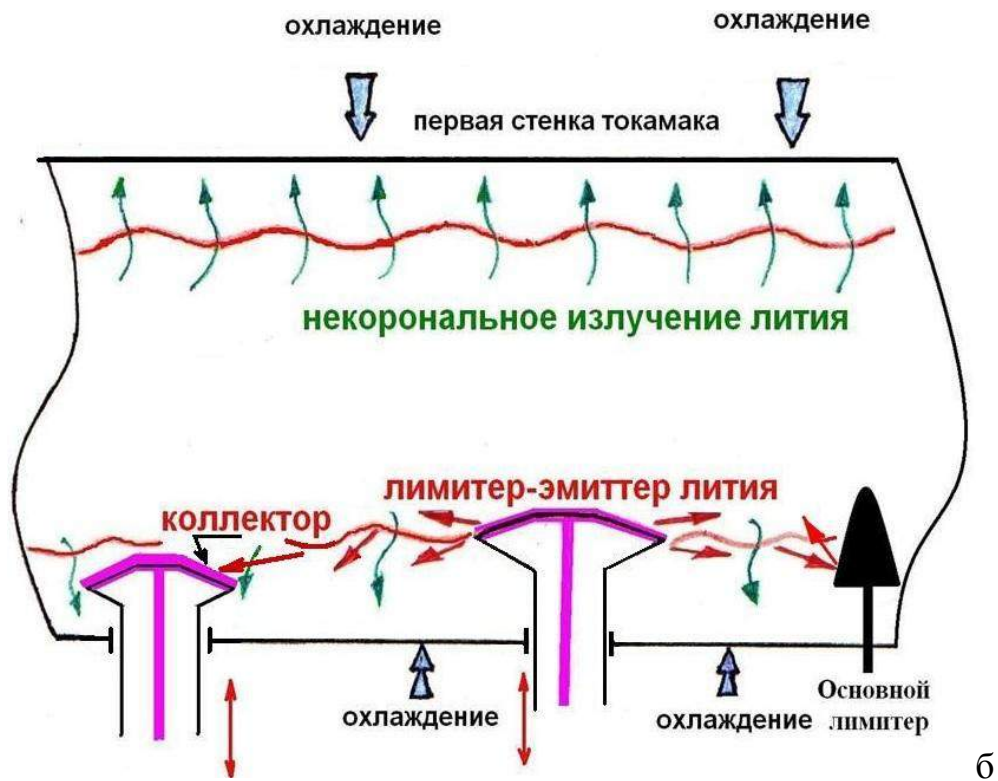


Рисунок 1.13. Организация охлаждения периферии плазмы: а – принципиальная схема концепции литиевого эмиттера-коллектора с литиевой эмиссией [38], б – принципиальная схема концепции литиевого эмиттера-коллектора с несколькими идентичными литиевыми лимитерами [39]

Про эмиссию лития было сказано выше. В работе [40] исследованы основные критические вопросы создания литиевого контура — транспортировка и сбор лития в вакуумной камере.

Эксперимент, поставленный на токамаке Т-11М, осуществлялся с помощью лимитера на основе вольфрам-литиевой КПС, выполняющего роль эмиттера лития. На Рисунке 1.14 показана схема «активной головы» лимитера с водяным охлаждением ( $200^{\circ}\text{C}$ ), которая одновременно и нагревает литий до температуры его плавления ( $180^{\circ}\text{C}$ ) и охлаждает в процессе плазменных разрядов. Капиллярно-пористая система лимитера выполнена из вольфрамового войлока, соединенного с литиевой питающей ёмкостью. Боковые «пассивные»

стороны лимитера были оборудованы развивающими поверхность вольфрамовыми «крыльями» для более эффективного сбора ионов лития.

Лимитер был успешно испытан в течение 2000 разрядов с мощностью в  $10 \text{ МВт/м}^2$  и длительностью 0,1 – 0,2 с. Главное отличие этого варианта лимитера от лимитера с КПС из нержавеющей стали — повышенная теплопроводность активного слоя КПС (в 2 – 3 раза). На Рисунке 1.15 показан лимитер до и во время разряда.

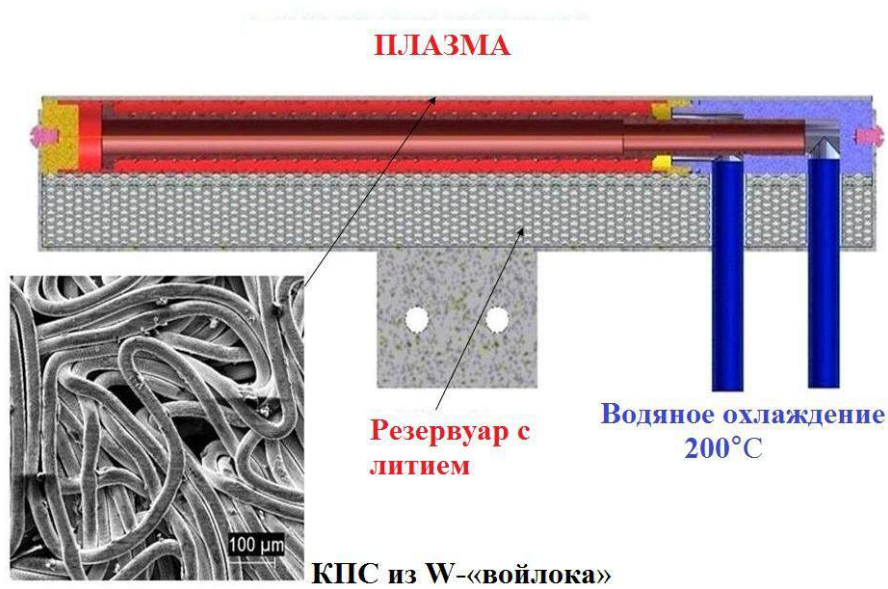


Рисунок 1.14. Схема «активной головы» лимитера с водяным охлаждением [40]

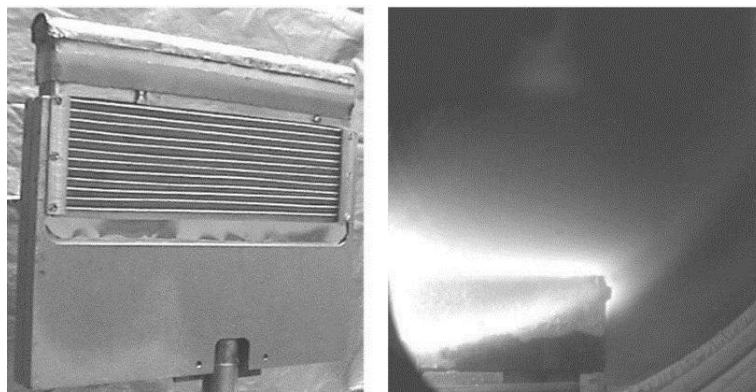


Рисунок 1.15. Литиевый лимитер токамака Т-11М до (слева) и во время (справа) разряда

Полные весовые потери «W-Li» лимитера в процессе процедуры литиизации вакуумной камеры [36] и работы в течение 1000 разрядов первой кампании было ниже 0,5 грамм. Полное количество лития, собранного боковыми сторонами лимитера и вольфрамовыми «крыльями» составило 0,2 грамма. Это значение близко к оценке полных потерь лития «активной головы» в процессе взаимодействия плазма-лимитер в течение всей кампании ( $60 \pm 20$  %) [35].

На Рисунке 1.16 показано распределение осаждённого лития по боковой поверхности лимитера от края литиевой питающей ёмкости до стенки камеры. Можно ясно различить три характерные зоны:

- 1) зона малого сбора лития, близкая к «активной голове» лимитера;
- 2) зона интенсивного осаждения лития;
- 3) периферийная зона малого сбора лития.

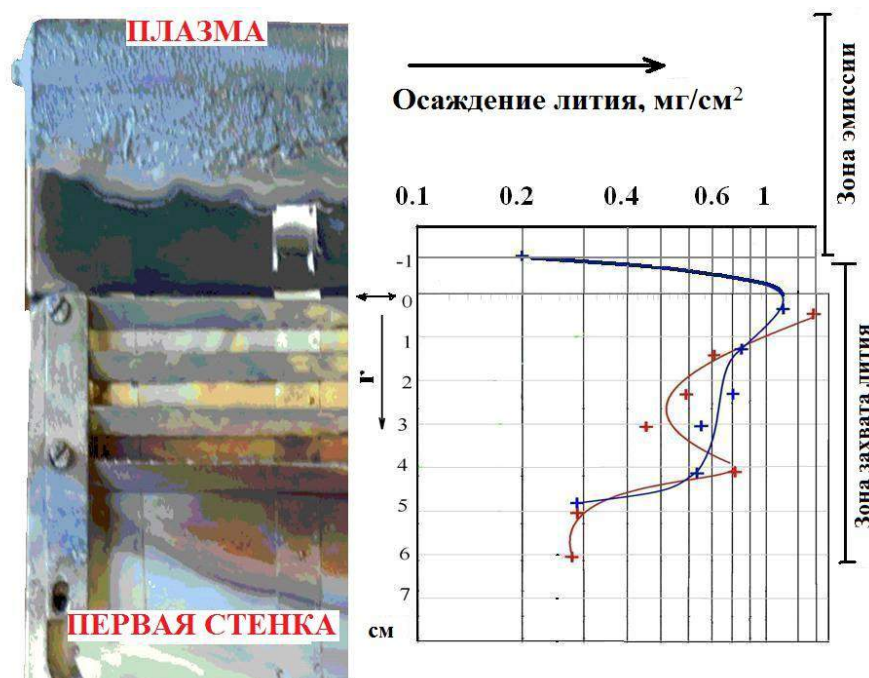


Рисунок 1.16. Вид боковой стороны литиевого лимитера (слева) и радиальное распределение осажденного лития на ней (справа)

Очевидно, что осаждение лития будет иметь минимум около «головы» лимитера, который имеет высокую температуру ( $300 - 400^{\circ}\text{C}$ ) в течение

плазменного разряда. В зоне интенсивного литиевого сбора вес осажденного лития увеличивается сначала в тени лимитера, а затем падает при приближении к стенке вакуумной камеры с характерной длиной падения (падение количества лития в  $e$  раз) 2 – 3 см. Эта область боковой стенки лимитера представляет собой главный коллектор ионов лития, которые перемещаются в SOL вдоль линий магнитного поля в тени лимитера. Для замыкания петли литий, осаждённый на боковых стенках, должен быть возвращён в эмиттер.

#### **1.4. Выводы по главе 1**

Из представленного литературного обзора ясно, что использование литиевых КПС для внутрикамерных элементов токамака чрезвычайно перспективно и на сегодняшний день даёт широкое поле для научных исследований новых методов термоизоляции плазмы от стенок токамака. Проведённые эксперименты на токамаке T-11M показали принципиальную возможность создания замкнутой литиевой петли для термоядерных реакторов стационарного действия. Были рассмотрены эмиссия и сбор лития лимитерами на основе КПС. К моменту начала работы над диссертацией оставался открытым вопрос о транспортировке лития из зоны коллектора в зону эмиттера. Предложенная бадминтонная модель, идея транспортировки лития с помощью сил поверхностного натяжения, а также расширенное исследование концепции замкнутой литиевой петли требуют создания новых моделей литиевых лимитеров для токамака T-11M. Решению этих задач посвящена часть данной диссертации. Будут рассмотрены кольцевой, вертикальный и продольный лимитеры для токамака T-11M. При работе с литием он неизбежно будет оседать в виде тонких плёнок на внутренней поверхности вакуумной камеры, что при длительной работе неизбежно приведёт к аварийным ситуациям. К моменту начала написания диссертации 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 иного, более технологического, решения. В диссертации будет дано описание такого метода с разработкой соответствующего устройства и последующим его испытанием. Вся литиевая программа на токамаке Т-11М направлена на развитие стационарного термоядерного синтеза, в том числе и на больших токамаках, таких как JET, ИТЭР, а в будущем и ДЕМО.

## Глава 2. Экспериментальные методы исследования

### 2.1. Токамак Т-11М. Описание экспериментальной установки

Научно-исследовательская работа, в рамках которой написана данная работа, проводилась на токамаке Т-11М (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, РФ). Токамак Т-11М — классический бездиверторный токамак [41] с круглым сечением вакуумной камеры. Характеристики токамака представлены в Таблице 3. Фотография токамака — на Рисунке 2.1.

К моменту начала работы над диссертацией на токамаке были установлены литиевый лимитер горизонтального исполнения (Рисунки 1.14 и 1.15) и графитовый лимитер. В процессе работы были спроектированы, изготовлены и испытаны кольцевой, вертикальный, продольные литиевые лимитеры и криогенная мишень для эвакуации лития из камеры токамака.

Таблица 3.  
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
Средняя омическая мощность в разряде, кВт	100
Длительность разряда, с	0,1...0,3
Ток в плазме, кА	7...100
Средняя электронная плотность, $\text{м}^{-3}$	$(1...5) \cdot 10^{19}$
Температура электронной компоненты на оси тора, эВ	300...400
Температура электронной компоненты у поверхности лимитера, эВ	20...30
Тепловой поток на поверхность лимитера, $\text{МВт/м}^2$	4...12
Рабочее вещество	$\text{H}_2$ , $\text{D}_2$ , He





Рисунок 2.1. Токамак Т-11М

Расположение лимитеров и диагностического оборудования токамака Т-11М показано на Рисунке 2.2.

Интенсивность эмиссионных линий нейтрального лития с поверхности литиевого лимитера и графитового лимитера измерялась оптической диагностикой (датчики линии LiI). В качестве сенсоров были применены фотодатчики с предусилителями и оптическими узкополосными интерференционными фильтрами для линии нейтрального лития LiI ( $\lambda = 670,8$  нм) и полосой пропускания приблизительно 5 нм. Также использовался датчик с интерференционным фильтром с максимальной передачей для линии нейтрального водорода  $H_{\alpha}$  ( $\lambda = 656,3$  нм) для регистрации потока рециркуляции дейтерия с графитового лимитера.

Датчик мягкого рентгена (SXR) применялся для оценки электронной температуры на оси плазменного шнура методом фольг (применялись бериллиевые фольги толщиной 30 и 60 мкм).

Датчики жёсткого рентгена (HXR) использовались для качественного контроля режимов с «убегающими электронами».



Для определения эффективного заряда плазмы  $Z_{\text{эфф}}(0)$  применялось сравнение расчётной и измеренной электропроводности плазмы (предполагалось,  $q(0) \approx 1$ ).

Пятиканальный микроволновый интерферометр на длине волны  $\lambda = 2$  мм использовался для определения плотности электронной компоненты  $n_e$ .

Быстродействующий ИК-радиометр (IR) с охлаждаемым Ge:Au детектором применялся для измерения температуры литиевой поверхности лимитеров в процессе разряда. Быстродействие устройства составляет 100 мс, чувствительность —  $1^\circ\text{C}$ , рабочая длина волны —  $\lambda = 3 \dots 6$  мкм.

Для измерения радиационных потерь на токамаке Т-11М использовался 16-ти канальный фотодиодный болометр, направленный тангенциально к оси плазменного шнура.

Кроме всех вышеперечисленных диагностик в измерениях активно участвовали диагностики лимитеров — термоэлектрические элементы, однако в силу их инертности их применение ограничено. Они использовались для измерения температуры литиевой поверхности и определения его фазового состояния при подготовке лимитера к работе, калибровки ИК радиометра, измерения скачка температуры во время разряда, определения энерговклада и теплоёмкости лимитера [43].

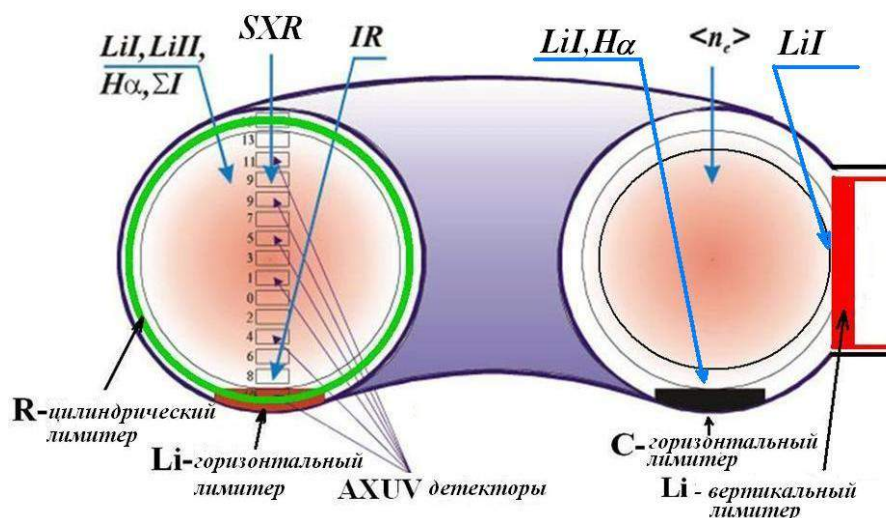


Рисунок 2.2. Схема расположения лимитеров и диагностик Т-11М [42]

## **2.2. Подготовка литиевых КПС к экспериментам**

В качестве основного материала принимающей поверхности устройства использовался литий марки ЛЭ-1. В качестве основы КПС — сетка тканая из нержавеющей стали марки 03X19H11ВИ и элементы из вольфрамового «войлока». Перед смачиванием они были обезжирены и подвергнуты вакуумной термообработке при температуре 700°C. Вопросы выбора материалов для основы КПС будут подробно рассмотрены в главе 3.

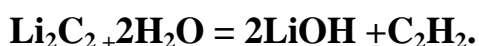
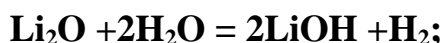
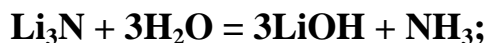
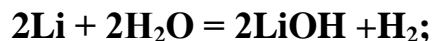
## **2.3. Экспериментальные методы, используемые в экспериментах с литиевыми устройствами**

Распределение лития и его потоков в SOL токамака при применении литиевых устройств является ключевой информацией для выработки рекомендаций к эффективному охлаждению периферии плазмы, поэтому необходимо выстроить точную систему измерений. В этих целях на токамаке Т-11М применяется графитовый лимитер, который находится в тени основного литиевого лимитера. При такой схеме ионы лития, циркулирующие в SOL токамака, приходят на графитовый лимитер, рекомбинируют и излучают. По рекомбинационному излучению можно судить о количестве ионов лития. Графитовый лимитер имеет возможность перемещения относительно центра плазмы от разряда к разряду. Таким образом, перемещая лимитер, можно «просканировать» весь SOL токамака и определить распределение лития в нём [44, 45].

Для оценки характера миграции лития, а также для оценки величины захваченного водорода во время экспериментов применялся метод «вспышки». Суть метода заключается в следующем: первая серия разрядов выполняется с литиевым лимитером в качестве основного, графитовый лимитер находится в тени. Потом лимитеры меняются ролями. Для очистки графитового лимитера от осаждённого лития требуется два-три плазменных разряда. В процессе

экспериментов фиксируется эмиссия с графитового лимитера. Повышение или хотя бы стабильное значение литиевой эмиссии с графитового лимитера говорит о том, что литий мигрирует с литиевого на графитовый лимитер. Подобным образом происходит исследование захвата водорода в процессе разрядов. Отличие состоит лишь в том, что роль графитового играет дополнительный литиевый лимитер и фиксируется эмиссия водорода [43, 44].

В экспериментах с кольцевым лимитером и криогенной мишенью важно было узнать абсолютное количество лития, захваченное устройством. Однако, как известно, литий химически активен по отношению к основным компонентам воздуха — азоту, кислороду и парам воды. В течение изъятия образцов-свидетелей осаждённый литий неизбежно взаимодействует с азотом и кислородом из воздуха и формирует смесь  $\text{Li}_3\text{N}:\text{Li}_2\text{O}=3:1$  [46]. В результате, анализ абсолютного количества лития, осаждённого на образце, представляет сложную проблему. В экспериментах на токамаке T-11M она была решена следующим путём: образцы-свидетели были экспонированы в плазме, а затем были вынесены на воздух в течение вентилирования камеры и опущены в кипящую воду. При этом происходят следующие реакции с водой:



Как можно видеть, LiOH всегда появляется в продуктах реакции. Количество LiOH в водном растворе и, соответственно, начальное количество лития в образцах-свидетелях определяется с помощью метода химического титриметрического анализа [47]. Абсолютная калибровка метода была выполнена с помощью пробного литиевого образца. Основной недостаток метода — низкая точность ( $\pm 10\%$ ), однако в рамках исследовательской работы данной точности оказалось достаточно.

Для получения предварительной информации о миграции примесей в плазменной камере T-11M были экспонированы образцы сетки из

нержавеющей стали собирающих элементов кольцевого лимитера. Образцы размером 40×45 мм, предварительно смоченные литием в аргонно-вакуумном перчаточном боксе, экспонировались в течение ~ 200 плазменных разрядов в непосредственной близости от литиевого лимитера. После извлечения из плазменной камеры токамака образцы были прогреты на воздухе для перевода, находящегося на них лития и, возможно, перенесенных из плазменной камеры других элементов в нейтральную форму. Для исследования элементного состава взятого образца был использован растровый электронный микроскоп, оснащенный энергодисперсионным рентгеновским анализатором, позволяющим определять содержание химических элементов, начиная от бора и до урана. Чувствительность метода составляла  $\sim 10^{-3}\%$  и точность —  $\pm 0,01\%$  по массе.

#### **2.4. Материалы на основе ванадия и их подготовка к экспериментам по исследованию коррозионного взаимодействия с литием и сплавом натрия с калием эвтектического состава**

В главе 5 будут подробно описаны эксперименты по исследованию коррозионного взаимодействия новых перспективных ванадиевых сплавов с литием и сплавом натрия с калием эвтектического состава. В качестве основного исходного материала при выплавке сплавов использовался ванадий марки ВНМ1, для легирования сплавов использовали электролитический хром, йодидный титан, высокочистые галлий и монокристаллический кремний. Сплавы выплавляли в дуговой печи с нерасходуемым электродом в атмосфере химически чистого аргона.

Исследуемые образцы в опытах по исследованию коррозионной стойкости ванадиевых сплавов в литии представляли собой холоднодеформированные пластины (на ~ 30 %) с размерами 20 x 10 x 2 мм. Образцы отжигались при температуре 1000°C в течение 1 часа с последующей полировкой в реактиве 20% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 80% этилового спирта. Образцы сплавов

облучали с двух сторон в ускорителе ИЛУ [48] ионами аргона с энергией 20 кэВ до дозы  $10^{22} \text{ м}^{-2}$  при плотности потока ионов  $6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Температура мишеней в процессе облучения составляла  $\sim 400^\circ\text{C}$ . Испытания проводили в статических изотермических условиях в ампулах из сплава V – 9 Cr, которые заправляли литием марки ЛЭ-1 с исходным содержанием примесей азота, кислорода и углерода на уровне 0,02 – 0,03 масс. % с последующей герметизацией сваркой в атмосфере аргона. Ампулы помещали в защитные контейнеры из нержавеющей стали, которые герметизировали сваркой в атмосфере аргона и помещали в печь [49].

Исследуемые образцы в опытах по исследованию коррозионной стойкости ванадиевых сплавов в сплаве натрия с калием эвтектического состава представляли собой цилиндры диаметром 16 мм, толщиной 1 мм и высотой 15 мм. Образцы нелегированного ванадия представляли собой пластинки с габаритами 10x10x1 мм. Испытания в среде жидкого металла проводили в ампулах  $\varnothing 20 \times 1$  мм высотой 60 мм, изготовленных из сплава V – 9 Cr с доньшками из нелегированного листового ванадия. Заправку жидкого металла в ампулы проводили из заправочной емкости при комнатной температуре в герметичном боксе в среде высокочистого аргона, прошедшего дополнительную очистку геттерированием циркониевой стружкой при  $\sim 800^\circ\text{C}$ . В каждую ампулу заливали  $4,0 \pm 0,5$  г жидкого металла. Герметизацию ампул проводили аргонодуговой сваркой в атмосфере инертного газа [50].

Экспериментальные образцы в опытах по исследованию коррозионной стойкости ванадиевых сплавов в конвективном потоке сплава натрия с калием эвтектического состава представляли собой цилиндры из ванадиевого сплава V – 4Ti – 4Cr диаметром 16 мм, толщиной 1 мм и высотой 3 мм. Ампула для испытаний изготавливалась из того же сплава и представляла собой трубу диаметром 50 мм, толщиной 3 мм и длиной 300 мм [51].

## 2.5. Экспериментальные методы определения коррозионной стойкости ванадиевых сплавов

Эксперименты по исследованию коррозионного взаимодействия ванадиевых сплавов со статичной средой проводились методом «переворота» ампулы [52] (Рисунок 2.3). Сначала ампулы с образцами выдерживаются в позиции 1. В таком положении образцы находятся в атмосфере инертного газа, коррозионно-активная среда контактирует с геттером (циркониевая трубка). В результате этого этапа содержание неметаллических примесей (в первую очередь азота и углерода) в среде уменьшается. Второй этап предполагал переворот ампулы и её выдержку. В таком положении образцы погружались в среду, очищенную от примесей в ходе первого этапа.

После вскрытия ампул измерялись твёрдость и масса образцов. Полученные данные сравнивались с показателями образцов до эксперимента. Твёрдость определялась двумя методами: методом Виккерса и методом кинетической твёрдости (непрерывного индентирования) [53, 54]. В первом случае измеряется микротвёрдость ( $H_\mu$ ) на приборе 401/402 MVD с помощью индентора, имеющего форму квадратной алмазной пирамидки с углом у вершины  $136^\circ$ , при нагрузке на него  $P = 50$  г на исходных образцах и на образцах, выдержанных в литии, а также на поперечных шлифах после выдержки в среде. Для приготовления шлифов образцы помещались в латунное кольцо диаметром приблизительно 30 мм и заливались сплавом Вуда для предотвращения завала краёв образцов при шлифовке и полировке. Во втором случае используется прибор Nanotest, где в процессе внедрения индентора (трёхгранной алмазной пирамидки Берковича) в исследуемый материал непрерывно регистрируется нагрузка на индентор —  $P$  (в данном случае от 10 до 6000 мН) и глубину вдавливания индентора —  $h$ , что позволяет анализировать поверхностный слой толщиной от 400 до 16000 нм. Полученная диаграмма вдавливания  $P = f(h)$  методом Оливера-Фарра [54] конвертируется в функцию твёрдость-глубина.

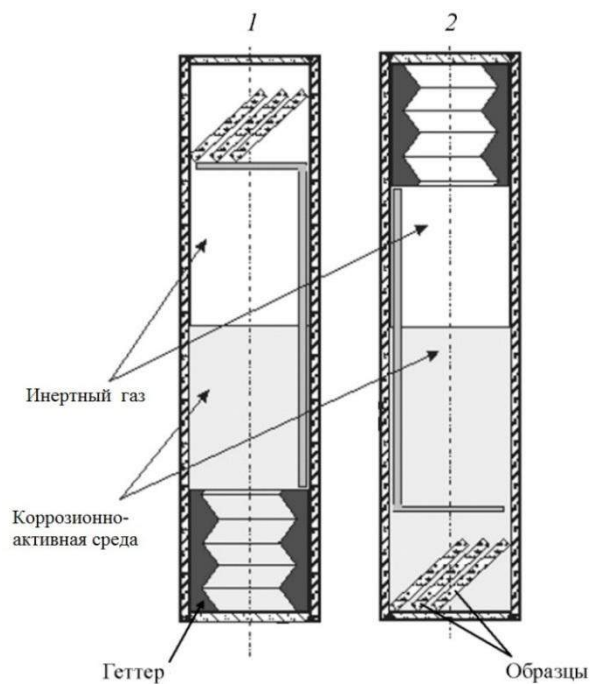


Рисунок 2.3. Схема проведения экспериментов по исследованию коррозионного взаимодействия ванадиевых сплавов в статичных условиях (метод «переворота» ампулы)

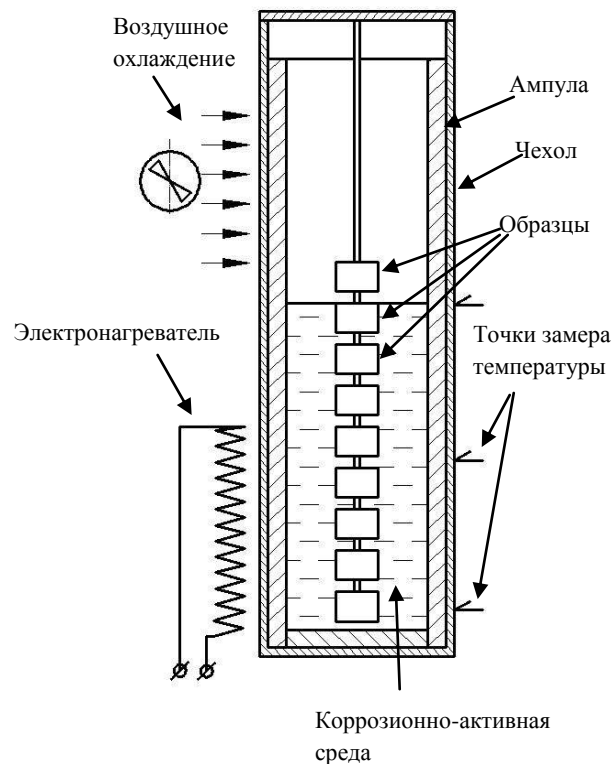


Рисунок 2.4. Схема проведения экспериментов по исследованию коррозионного взаимодействия ванадиевых сплавов в конвективном потоке

Топография поверхности образцов исследовалась до и после выдержки в литии на оптическом металлографическом микроскопе Neophot и в сканирующем электронном микроскопе JSM-35CF. Взвешивание образцов проводилось на аналитических лабораторных весах ВЛР-200, точность измерения на которых составляет  $5 \cdot 10^{-5}$  г.

Эксперименты по исследованию коррозионного взаимодействия ванадиевых сплавов в конвективном потоке проводились по схеме, изображённой на Рисунке 2.4: исследуемые образцы (13 штук) крепятся на планке из сплава V – 4Ti – 4Cr. Ампула помещается в защитный чехол из нержавеющей стали. К крышке чехла крепится планка с образцами, также через

неё проходят заправочные и откачные трубы. На нижнюю часть ампулы наматывается проволоочный нагреватель. Заправка ампулы проводилась при комнатной температуре через заправочный трубопровод в атмосфере аргона. Объём расплава — 280 мл. Контроль заправки осуществлялся с помощью специального уровнемера. При заправке из ёмкости-хранилища жидкий металл пропускается через фильтр из нержавеющей стали с радиусом пор  $\sim 30$  мкм. После заправки вспомогательный трубопровод заваривался в атмосфере защитного газа. В ходе эксперимента было обеспечено воздушное охлаждение верхней части ампулы.

Образцы были исследованы стандартными методами гравиметрии (аналитические весы АДВ-200), микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе ZEISS EVO 50XV с приставкой INCA X-act, рентгеновского фазового анализа на дифрактометре ДРОН-7 и путем измерения микротвердости на твердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор 50 г.

## **2.6. Выводы по главе 2**

В главе 2 показано, что результаты получены с применением современного, высокоточного и метрологически аттестованного оборудования по стандартным методикам и ГОСТам. 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.



### **Глава 3. Внутрикамерные устройства токамаков на основе литиевых капиллярно-пористых систем**

Работа с литиевыми лимитерами на токамаке Т-11М началась в 1998 году и продолжается по сей день. Основная суть работы любого внутрикамерного литиевого элемента заключается в том, что над поверхностью устройства образуется слой испарённого лития и его естественных примесей, эффективно переизлучающий приходящую пиковую энергию в ультрафиолетовое излучение. Было доказано [39], что эмитированный литий концентрируется в периферийном слое толщиной приблизительно 5 см. Исходя из этого, была разработана концепция замкнутой литиевой петли, которая предполагала наличие литиевого эмиттера, расположенного в горячей области контакта горячей плазмы с лимитером, и литиевого коллектора, расположенного преимущественно в более холодной области, но в то же время в области, где собирается эмитированный литий. Эмиттер и коллектор должны быть соединены системой транспортировки лития для поддержания циркуляции лития в такой системе. Принцип концепции проиллюстрирован на Рисунке 1.13а.

Разумеется, в процессе работы будут иметь место невосполнимые потери лития, например, при осаждении его в виде тонких плёнок на стенках вакуумной камеры, но как будет показано далее, величины потерь лития в краткосрочной перспективе не столь значительны, что позволяет надеяться на организацию стационарной защиты стенок токамака. В ходе работы над диссертацией автором были созданы следующие внутрикамерные устройства (Рисунок 3.1): кольцевой, вертикальный, продольный литиевые лимитеры и криогенная мишень.

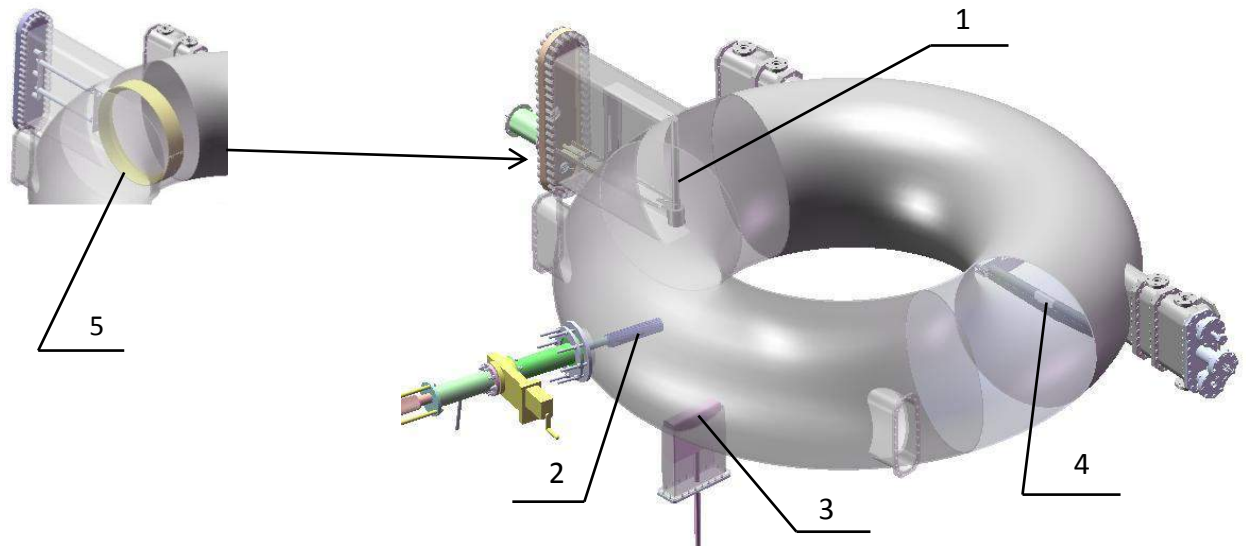


Рисунок 3.1. Внутрикамерные элементы токамака Т-11М: 1 – вертикальный лимитер, 2 – криогенная мишень, 3 – графитовый лимитер, 4 – продольный лимитер. 5 – кольцевой лимитер (располагается в антенном патрубке, заменяя вертикальный лимитер поз. 1)

### 3.1. Основные требования, предъявляемые к литиевым внутрикамерным устройствам

При проектировании литиевых внутрикамерных устройств необходимо учитывать специфику их работы, а именно:

- 1) устройство должно быть снабжено достаточным количеством лития и/или иметь систему питания литием;
- 2) литиевая поверхность должна быть прогрета до температуры выше температуры плавления лития ( $T_{пл}=180^{\circ}\text{C}$ );
- 3) необходимо предусмотреть эффективный теплоотвод, гарантирующий температуру поверхности не выше  $550^{\circ}\text{C}$ . Данное требование вводится для недопущения выбросов больших потоков лития в плазму посредством испарения;

4) должно выполняться условие капиллярного напора на протяжении всего пути мигрирования лития в пределах устройства, а также условие удержания жидкого лития КПС;

5) при работе токамака в конструкции лимитера будут генерироваться контурные токи и, как следствие, будут возникать пондеромоторные силы, действующие на конструкцию, поэтому необходимо проектировать конструкцию с минимальным количеством замкнутых проводящих контуров;

6) для возможности регенерации литиевой поверхности тлеющим разрядом литиевый лимитер должен быть электрически изолирован от камеры токамака с возможностью замыкания на неё через сопротивление во избежание накопления заряда во время штатной работы;

7) литиевая поверхность должна быть защищена от воздействия атмосферы в процессе транспортировки и монтажа.

Требования к материалам литиевых лимитеров:

1) все используемые материалы должны обладать диамагнитными или парамагнитными свойствами для минимизации токов Фуко;

2) материал твёрдой основы КПС должен быть совместим с жидким литием и не образовывать с ним раствора. Пористость, эффективный радиус пор и характер плетения должны подбираться с учётом полного удержания жидкого лития силами поверхностного натяжения;

3) все материалы должны иметь высокую теплопроводность для быстрого выравнивания температур и предотвращения локального перегрева;

4) все материалы должны соответствовать тепловой нагрузке, приходящей на них в процессе работы;

5) материалы изоляторов также должны выбираться из соображений тепловой нагрузки и совместимости изолятора с жидким литием;

6) материалы тепловых аккумуляторов должны иметь высокую величину теплоёмкости;

- 7) конструкционные материалы должны быть технологичными;
- 8) материалы должны обладать пониженным уровнем наведённой радиоактивности («малоактивируемость»).

### 3.2. Вопросы выбора материала-основы КПС

Способность жидкого металла смачивать контактирующие с ними материалы, проникать в поры и трещины зависит от смачиваемости материалов металлом и его поверхностного натяжения. Для литья в интервале температур 200 – 1300°C величина поверхностного натяжения определялась экспериментально. Обобщенное уравнение для поверхностного натяжения литья (в мН/м) имеет следующий вид:

$$\sigma = 438,98 - 18,44 \cdot 10^{-3}T - 132,20 \cdot 10^{-6}T^2 + 37,44 \cdot 10^{-9}T^3. \quad (3.1)$$

Сравнивая величину поверхностного натяжения, мН/м (при температуре плавления) для литья – 406, натрия – 200, калия – 112, рубидия – 87 и цезия – 71, можно видеть, что литий имеет максимальное значение этой характеристики [55]. Это в сочетании с низкой плотностью и определяет уникальные капиллярные свойства литья.

Высокое значение поверхностного натяжения литья обуславливает высокое капиллярное давление, которое может создаваться в литиевых капиллярных структурах  $P_c$ , Па, которое определяется соотношением:

$$P_c = 2 \cdot \sigma(T) \cdot \cos \theta \cdot R_{эфф}^{-1}, \quad (3.2)$$

где  $\theta$  — краевой угол смачивания,  $R_{эфф}$  — эффективный радиус пор в капиллярной системе. Зависимость капиллярного давления в литиевых капиллярных структурах при  $\cos \theta = 1$  представлена на Рисунке 3.2 [55].

Материалами для КПС могут быть сетки тканые из нержавеющей стали 03X19H11ВИ (Рисунок 3.3), 03X17H11МИ, меди М0, латуни Л63.

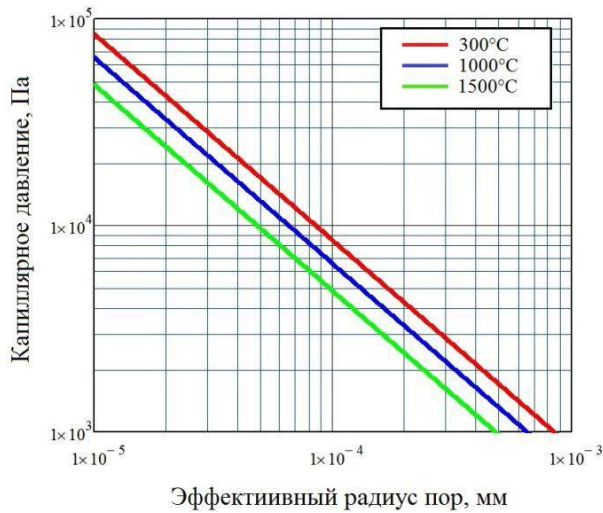


Рисунок 3.2. Капиллярное давление лития  $P_c$  как функция эффективного радиуса пор КПС  $R_{эфф}$

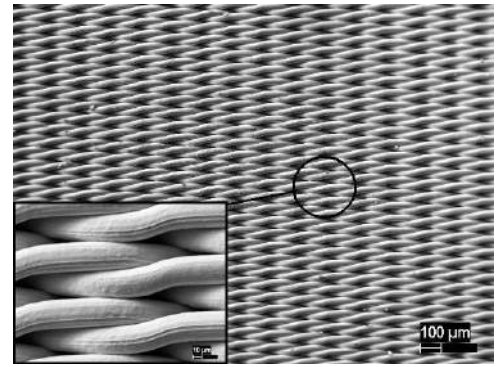


Рисунок 3.3. Капиллярно-пористая структура на основе сетки из нержавеющей стали 03Х19Н11ВИ с эффективным радиусом пор 30 мкм

Как было уже сказано одним из критериев работоспособности лимитера на основе литиевой КПС является удержание жидкого лития капиллярно-пористой структурой. Дестабилизирующим фактором в данном случае являются электромагнитные силы от взаимодействия наведённых токов с магнитным полем. Компенсация этих сил осуществляется подбором сетки КПС с таким эффективным радиусом пор, чтобы силы поверхностного натяжения превосходили электромагнитные силы. В главе 1 упоминалось, что на токамаке Т11-М были проведены эксперименты по удержанию лития капиллярно-пористой структурой [34], показавшие, что сетка с эффективным радиусом пор 30 мкм способна удержать жидкий литий в условиях токамака Т-11М. При выборе материала сетки также необходимо учитывать совместимость материалов и их теплофизические характеристики. Во избежание локальных перегревов материал сетки должен иметь высокую теплопроводность, поэтому логично выбрать сетку из таких материалов как медь или серебро. Однако литий с этими материалами образует твёрдый раствор [56, 57]. Растворимость

стали в литии составляет  $6 \cdot 10^{-4} \%$ , поэтому в качестве основного материала твёрдой матрицы КПС для всех созданных лимитеров была выбрана нержавеющая сталь марки 03X19H11ВИ (Рисунок 3.3). Эта сталь относится к аустенитному классу сталей, взаимодействие с которыми с литием в условиях токамака хорошо изучено [58].

При всех достоинствах нержавеющей стали как материала для твёрдой матрицы КПС с увеличением мощности токамаков и времени удержания плазмы будет требоваться иной, более термостойкий материал. При увеличенной тепловой нагрузке КПС на основе нержавеющей стали теряет устойчивость и в зоне взаимодействия с плазмой начинает «отслаиваться» от теплоаккумулятора, что приводит к её разрушению. Для лимитеров на токамаке Т-11М это не столь критично как, например, для лимитеров на токамаках FTU, КТМ. По этим соображениям для лимитеров этих токамаков необходимо создавать КПС на основе материала с большей плотностью, теплопроводностью и теплоёмкостью, а также совместимым с жидким литием в условиях токамака. На сегодняшний день такой материал есть — это элементы из прессованной вольфрамовой проволоки очень малого диаметра ( $\approx 30$  мкм). Структура такого материала очень напоминает войлок. На Рисунке 3.4 показан такой элемент и его структура. Из-за сложности в его изготовлении один такой элемент имеет очень высокую цену, поэтому его применение достаточно ограничено. Ниже будет рассмотрено устройство (продольный лимитер токамака Т-11М), в котором используются элементы из вольфрамового «войлока».

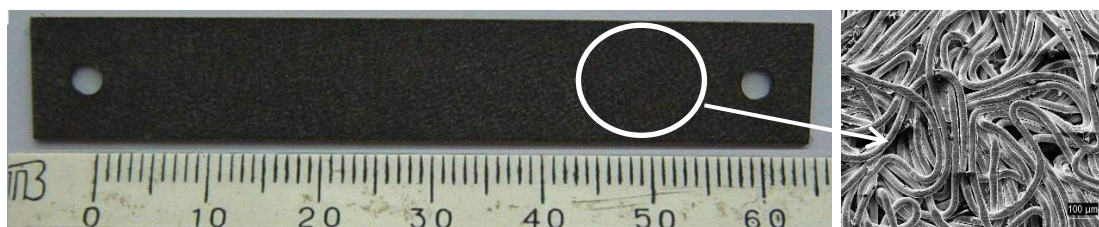


Рисунок 3.4. Элементы из вольфрамового «войлока»

### **3.3. Тепловое состояние литиевых лимитеров. Обобщённая методика теплового расчёта литиевых лимитеров**

Наряду с удержанием лития капиллярно-пористой системой работоспособность устройства напрямую зависит от его теплового состояния. Нижняя граница температурного диапазона, равная  $200^{\circ}\text{C}$ , вводится для обеспечения фазового состояния лития ( $T_{\text{пл}}=180^{\circ}\text{C}$ ), верхняя ( $550^{\circ}\text{C}$ ) — для ограничения уноса лития с поверхности лимитера путём испарения. Очевидно, что тепловой расчёт — неотъемлемая часть конструкторской работы по созданию таких внутрикамерных элементов.

#### **3.3.1. Методика расчёта начального теплового состояния лимитера**

Рабочий цикл литиевых лимитеров на токамаке включает в себя подготовительный этап и, собственно, работу устройства в плазменных условиях. На подготовительном этапе необходимо перевести литий, заключённый в капиллярно-пористую структуру, в жидкое состояние. Для созданных лимитеров предварительный нагрев осуществляется с помощью электрического нагревателя, который помещается внутрь лимитера. Обобщённо конструкция лимитера представляет собой пористый мат из КПС, установленный на тепловой аккумулятор, который в свою очередь крепится на опорной трубе. При такой геометрии устройства и способе его нагрева расчёт начального теплового состояния сводится к задаче о теплопроводности очень длинного многослойного цилиндра с источником объёмного тепловыделения на внутренней стенке и теплосбросом путём излучения с внешней стенки и теплопроводности через элементы крепления. Цель расчёта: определить требуемую электрическую мощность нагревателя для полного перевода лития в жидкую фазу в любой точке устройства. Расчётная схема представлена на Рисунке 3.5.

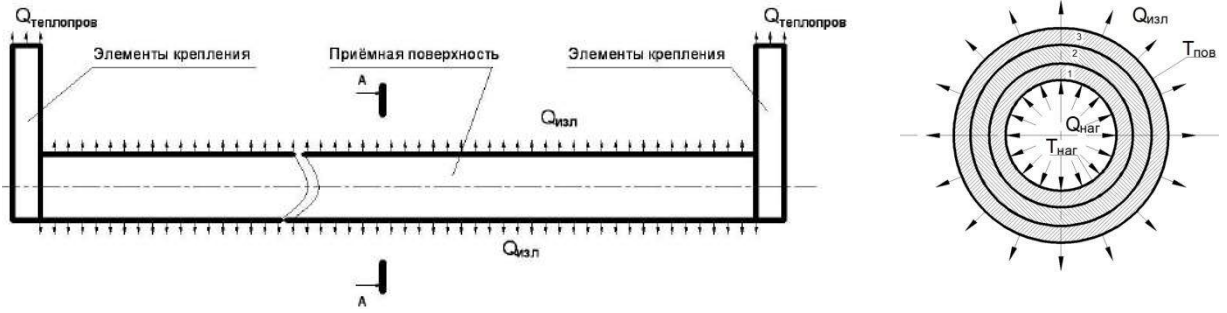


Рисунок 3.5. Обобщённая расчётная схема начального теплового состояния лимитера. Слева – общий вид, справа – сечение А-А

Каждый слой имеет свои теплофизические (плотность, теплопроводность, теплоёмкость) и геометрические (диаметр цилиндров) характеристики. В данном случае первый слой – это тепловой аккумулятор, 2ой и 3ий слои — КПС (2 различных вида). Предполагается идеальный тепловой контакт слоёв между собой. Температура внутренней поверхности равна температуре нагревателя  $T_{\text{наг}}$ , внешней поверхности — нижней границе температуры рабочего диапазона. Тепловая мощность от нагревателя  $Q_{\text{наг}}$  передаётся в конструкцию через внутреннюю стенку. Тепло с поверхности сбрасывается излучением и теплопроводностью в элементы конструкции (например, в узлах крепления лимитера к кронштейну). Тепловой поток  $Q_{\text{изл}}$  с поверхности лимитера по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{изл}} = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{\text{СБ}} \cdot T_{\text{пов}}^4, \quad (3.3)$$

где  $S$  — площадь поверхности лимитера,  $\varepsilon \approx 0.2$  — степень черноты поверхности,  $\sigma_{\text{СБ}} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана-Больцмана. В стационарном состоянии тепловой поток одинаков по всему сечению:

$$Q_{\text{наг}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{теплопр}} = Q, \quad (3.4)$$

где  $Q_{\text{теплопр}}$  — тепловой поток в элементы конструкции

Из [59] решение задачи теплопроводности:

$$T_{\text{наг}} - T_{\text{пов}} = \frac{Q}{2\pi} \left( \frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \left( \frac{d_3}{d_2} \right) + \frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln \left( \frac{d_{\text{пов}}}{d_3} \right) \right), \quad (3.5)$$

где  $d_i$  — внутренний диаметр  $i$ -го слоя,  $\lambda_i$  — теплопроводность  $i$ -го слоя.



Отдельно стоит упомянуть о теплофизических характеристиках капиллярно-пористой структуры. Капиллярно-пористую структуру в общем виде можно представить как конгломерат из  $k$  материалов со своими теплофизическими характеристиками и своей объёмной долей  $\varepsilon$  в КПС. Тогда характеристики такой капиллярно-пористой структуры:

$$\rho_{CPS} = \sum_{i=1}^k \rho_i \cdot \varepsilon_i ; \quad (3.6)$$

$$\lambda_{CPS} = \sum_{i=1}^k \lambda_i \cdot \varepsilon_i ; \quad (3.7)$$

$$C_{p\ CPS} = \sum_{i=1}^k C_{p\ i} \cdot \varepsilon_i . \quad (3.8)$$

Используя данную методику расчёта, мы можем лишь приблизительно оценить тепловое состояние поверхности лимитера, к тому же для созданных лимитеров достаточно проблематично определить  $Q_{\text{теплопр}}$ . Для уточнения расчёта начального теплового состояния следует решить дифференциальное уравнение теплопередачи с учётом радиационного охлаждения:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_n - Q = 0, \quad (3.9)$$

где  $Q_n$  — удельное (в единице объёма) тепловыделение источника тепла,  $x_i$  —  $i$ -ая ось системы координат.

Решение данного уравнения для проектируемых лимитеров будет выполнено автором численными методами в системе CosmosFlowWorks. Для каждого случая будут задаваться своя исходная геометрия, начальные условия и теплофизические характеристики материалов, входящих в состав лимитера. Результатом этих вычислений станет температурное поле лимитера от нагревателя с некоторой начальной мощностью. Критерием выбора нагревателя с заданной тепловой мощностью в данном случае будет температура лития в наиболее отдалённой точке лимитера ( $T > T_{\text{пл}}$ ). В случае невыполнения условия расплавления лития необходимо будет выполнить расчёт температурного поля лимитера с нагревателем большей мощности. Расчёт должен проводиться итерационным методом до тех пор, пока не будет выполнено условие перехода лития в жидкую фазу в любой точке лимитера.

На основе результатов уточнённого расчёта выбирается электрический нагреватель. Во избежание недогрева следует выбирать нагреватель с запасом по мощности. Материал нагревательного элемента следует выбирать, основываясь на температуре самого нагревателя в процессе работы.

### **3.3.2. Методика расчёта теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой**

Цель данного расчёта — определение распределения теплового потока, приходящего из плазмы по поверхности лимитера, определение полной мощности, воспринимаемой лимитером, увеличения температуры поверхности за время плазменного импульса и её распределения по глубине лимитера. Основным источником тепла, приходящего на лимитер, — потоки заряженных частиц, дрейфующих вдоль линий магнитного поля в SOL токамака, и излучение плазмы.

Рассмотрим конфигурацию магнитного поля токамака. Его силовые линии как бы «навинчиваются» на тор (Рисунок 3.6). После достаточно большого числа оборота силовая линия описывает некую пространственную кривую, которая описывает в пределе псевдоповерхность, называемую магнитной поверхностью. Заряженные частицы при такой организации поля движутся вдоль силовой линии, одновременно с этим вращаясь вокруг неё с Ларморовским радиусом. Лимитеры (любые, не только проектируемые в данной работе) всегда задают радиус последней замкнутой магнитной поверхности, таким образом, задавая радиус плазмы  $R_{pl}$ . В области, начиная от периферии плазмы и вплоть до стенок вакуумной камеры токамака, лежит т.н. SOL (scrape-off layer). Особенность этой области заключается в том, что силовые линии магнитного поля разрываются стоящим лимитером. Отсюда следует, что частицы, двигающиеся вдоль силовой линии в SOL неизбежно ударяют в лимитер, передавая ему некоторое количество энергии.

Рассмотрим в общем виде проектируемые лимитеры в SOL. По их расположению относительно плазмы условно можно разделить на три вида: полоидальные, рельсовые и тороидальные (Рисунок 3.7).

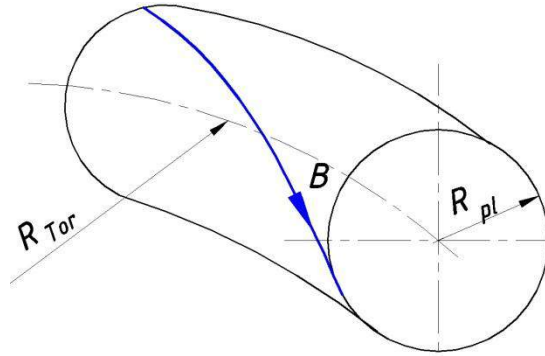


Рисунок 3.6. Конфигурация силовых линий магнитного поля токамака:  $R_{pl}$  – радиус плазменного шнура,  $R_{Tor}$  – тороидальный радиус плазмы

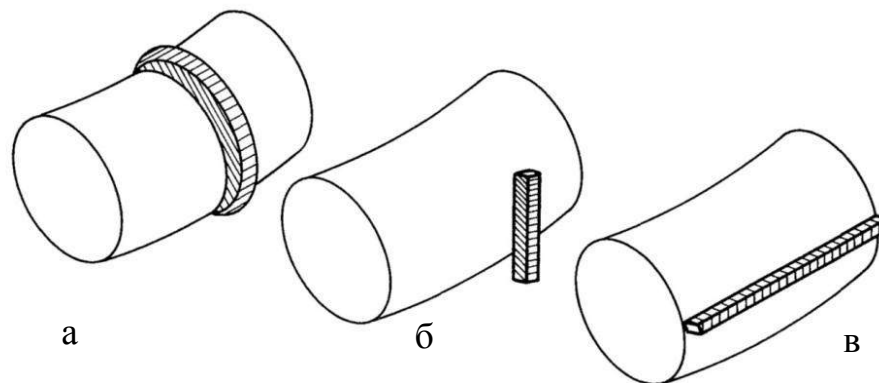


Рисунок 3.7. Основные виды лимитеров: а – полоидальный, б – рельсовый, в – тороидальный лимитеры [60]

Методику теплового расчёта рассмотрим на примере рельсовых лимитеров. Основные приёмы расчёта одинаковы для всех видов, различаться будут лишь некоторые зависимости. На Рисунке 3.8 изображена обобщённая схема теплового расчёта рельсового лимитера. Выберем произвольно на поверхности лимитера бесконечно малую площадку  $dS$ . На неё приходят потоки от излучения плазмы  $P_{изл}$  и от частиц, дрейфующих в SOL,  $P_{ч}$ . Введём для этой области расчёта следующую систему координат: ось  $X_{rad}$  направлена

радиально к оси плазмы, ось  $X_{\text{tor}}$  — касательно тороидальному направлению (вдоль тора), ось  $X_{\text{pol}}$  — касательно полоидальному направлению (вдоль периферии плазменного шнура). Примем также для упрощения расчётов допущение №1: с лимитером взаимодействует плазма, имеющая вид цилиндра (а не сегмента тора), располагающаяся непосредственно на ширине лимитера («над» ним). Данное допущение мы можем ввести, так как ширина рельсового лимитера обычно мала по сравнению с длиной оси плазмы.

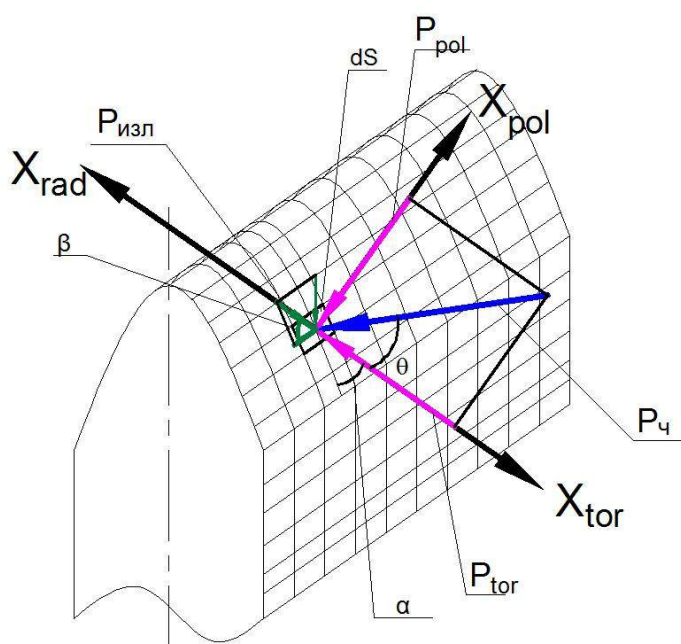


Рисунок 3.8. Обобщённая схема расчёта рельсового лимитера

Тепловой поток от излучения идёт по оси  $X_{\text{rad}}$  от оси плазмы, в свою очередь тепловой поток от частиц в SOL лежит в плоскости осей  $X_{\text{pol}}$  и  $X_{\text{tor}}$  и подходит к оси  $X_{\text{tor}}$  под углом  $\theta$ . Этот угол можно определить, используя такую характеристику токамака, как запас устойчивости  $q$ :

$$q(r) = \frac{B_{\text{tor}} \cdot r}{B_{\text{pol}}(r) \cdot R_{\text{tor}}}. \quad (3.10)$$

Геометрический смысл  $q$ : количество оборотов в тороидальном направлении, которое должна совершить частица, чтобы совершить один оборот в полоидальном. Тогда, принимая во внимание, что, по сути, частица

описывает цилиндрическую винтовую линию с шагом  $2\pi \cdot q(r) \cdot R_{\text{тор}}$  и основанием цилиндра  $2\pi \cdot r$  получаем:

$$\theta(r) = \arctg\left(\frac{r}{q(r) \cdot R_{\text{тор}}}\right). \quad (3.11)$$

К сожалению, получить из литературы зависимость  $q(r)$  не представляется возможным, однако из [61] известно, что в опытах с лимитерами  $q=2,9$  на последней замкнутой магнитной поверхности. Поэтому принимаем допущение №2: величина  $q$  в SOL постоянна и равна  $q(R_{\text{pl}})$ . Тогда имеем:

$$\theta = \theta(R_{\text{pl}}) = \arctg\left(\frac{R_{\text{pl}}}{q(R_{\text{pl}}) \cdot R_{\text{тор}}}\right). \quad (3.12)$$

Это приближение правомерно вводить, исходя из формулы (3.10), в которой  $r$  в числителе и  $B_{\text{pol}}(r)$  растут линейно на протяжении SOL с увеличением  $r$ .

Для каждого токамака, работающего в определённой конфигурации, существует своё соотношение между  $P_{\text{ч}}$  и  $P_{\text{изл}}$ . Для токамака Т-11М с металлическими лимитерами примерно 20% от общей мощности разряда составляет радиационная составляющая (и, соответственно, 80% составляющая от теплопереноса частицами в SOL), для разряда с литиевыми лимитерами доля радиационной мощности из-за эффекта переизлучения на ионах лития доходит до 80%. Как будет показано дальше, основную нагрузку на лимитер несёт именно тепловой поток от частиц в SOL, поэтому принимаем самый теплонапряжённый вариант:

$$P_{\text{изл}} = 0,2 \cdot P_{\text{разр}}; P_{\text{ч}} = 0,8 \cdot P_{\text{разр}}, \quad (3.13)$$

где  $P_{\text{разр}}$  — полная мощность разряда.

Как видно из Рисунка 3.7 площадка  $dS$  наклонена под углом  $\alpha$  к оси  $X_{\text{тор}}$ , под углом  $\beta$  к оси  $X_{\text{rad}}$  и под углом  $(90^\circ - \beta)$  к оси  $X_{\text{pol}}$ .

По определению плотность потока мощности через поверхность находится как:

$$Q = \frac{\bar{P}}{S} \cdot \bar{n}, \quad (3.14)$$

где  $P$  — вектор мощности,  $n$  — нормаль к поверхности. Тогда величину плотности потока мощности по поверхности от излучения плазмы найдём как:

$$Q_{\text{изл}} = \frac{P_{\text{изл}}}{S_{\text{Tor1}}} \sin \beta \cos \alpha = \frac{P_{\text{изл}}}{4\pi^2 R_{\text{Tor}} (R_{\text{pl}} + \Delta)} \sin \beta \cos \alpha. \quad (3.15)$$

В формуле (3.15)  $S_{\text{Tor1}}$  — площадь поверхности тора с осью, совпадающей с осью плазмы, и проходящий через рассматриваемую точку.  $\Delta = \Delta(x_1, x_2)$  — расстояние от рассматриваемой точки до последней замкнутой магнитной поверхности, где  $x_1$  и  $x_2$  — координаты, задающие положение площадки  $dS$  на поверхности лимитера, выбираемые в соответствии с конкретной конструкцией лимитера.

Плотность потока мощности через кольцевую поверхность SOL (тороидальная составляющая) от частиц считается по формуле из [62]:

$$Q_{\text{ч.tor}} = \frac{P_{\text{ч}}}{4\pi R_{\text{pl}} \lambda} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda}\right), \quad (3.16)$$

где  $\lambda$  — характерная длина падения теплового потока (в е раз), характеристика токамака. Для Т-11М эта величина равна 2 см. Вдоль магнитных силовых линий положительно заряженные частицы (ионы) движутся в одну сторону, а отрицательно заряженные (электроны) — в другую, то есть одна сторона лимитера будет бомбардироваться ионами, а другая — электронами. В работе [62] считается, что энергия, приносимая одним электроном и ионом одинакова.

В общем случае это неверно. Из [63] известно, что для малых токамаков:

$$T_e \approx (2 \dots 3) \cdot T_i. \quad (3.17)$$

Принимаем, что для токамака Т-11М:

$$T_e = 3 \cdot T_i. \quad (3.18)$$

Тогда имеем:

$$Q_{\text{ч.tor.i}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{P_{\text{ч}}}{2\pi R_{\text{pl}} \lambda} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda}\right); \quad (3.19)$$

$$Q_{\text{ч.tor.e}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{P_{\text{ч}}}{2\pi R_{\text{pl}} \lambda} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda}\right). \quad (3.20)$$

Учитывая, что поток приходит на площадку под определённым углом, имеем:

$$Q_{\text{tor.i(e)}} = Q_{\text{ч.tor.i(e)}} \cdot \sin \alpha; \quad (3.21)$$

$$Q_{\text{pol.i(e)}} = Q_{\text{ч.tor.i(e)}} \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \cos \beta \cos \alpha. \quad (3.22)$$

Суммарная плотность теплового потока на площадку  $dS$  будет составлять:

$$Q_{\Sigma i(e)} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{tor.i(e)}} + Q_{\text{pol.i(e)}}. \quad (3.23)$$

Проинтегрировав по всей площади лимитера, получаем интегральный поток, приходящий на поверхность:

$$P = \int Q_{\Sigma i} dS_i + \int Q_{\Sigma e} dS_e, \quad (3.24)$$

где  $S_i$  и  $S_e$  — площади ионной и электронной сторон лимитера.

Зная поверхностную плотность приходящей мощности на поверхность лимитера и используя формулу из [63] получаем зависимость увеличения температуры  $\Delta T$  произвольной точки на приёмной поверхности в зависимости от времени экспонирования  $t$ :

$$\Delta T_{i(e)} = 1,1 \frac{Q_{\Sigma i(e)} \sqrt{t}}{\sqrt{\rho_{\text{CPS}} \lambda_{\text{CPS}} C_{p \text{ CPS}}}}, \quad (3.25)$$

где  $\rho_{\text{CPS}}$ ,  $\lambda_{\text{CPS}}$ ,  $C_{p \text{ CPS}}$  — теплофизические характеристики КПС, определяемые по формулам (3.6) – (3.8).

Основной поток мощности в SOL распределён в слое толщиной  $\lambda$ , поэтому можно приближённо считать, что все точки, лежащие на поверхности лимитера, расстояние до которых от оси плазмы  $R_{\text{pl}} + \Delta(x_1, x_2)$  меньше, чем  $(R_{\text{pl}} + \lambda)$  лежат в зоне эмиттера. С помощью выражения (3.24) можно вычислить полную площадь приёмной поверхности лимитера, приняв  $Q_{\Sigma i} = Q_{\Sigma e} = 1$ . В общем виде:

$$S = \int dS = \iint f(x_1, x_2) dx_1 dx_2, \quad (3.26)$$

где  $f(x_1, x_2)$  — некоторая функция от обобщённых координат  $x_1, x_2$ , зависящая от геометрии устройства. Тогда используя функцию Хэвисайда, можно вычислить площадь эмиттерной зоны:

$$S_э = \int dS = \iint \Theta(\lambda - \Delta(x_1, x_2)) \cdot f(x_1, x_2) dx_1 dx_2. \quad (3.27)$$

Площадь коллекторной зоны соответственно находится следующим образом:

$$S_k = S - S_э. \quad (3.28)$$

Глубину проникновения тепловой энергии за разряд определим по формуле [63]:

$$X_T = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{CPS} \cdot t_{pl}}{\rho_{CPS} C_{p\ CPS}}}. \quad (3.29)$$

Основной критерий работоспособности из этого расчёта состоит в величине скачка температуры  $\Delta T$ . Должно выполняться общее условие работы устройства по температуре ( $T < 550^\circ\text{C}$ ). По величине  $X_T$  можно судить об адекватности применения формулы (3.25), так как она верна в предположении полубесконечной среды. Это условие выполняется при:

$$X_T \leq \delta_{\text{КПС}}. \quad (3.30)$$

Данная методика применима не только для рельсовых лимитеров. Легко видеть, что основной подход основан на том, что мы нашли плотность теплового потока на бесконечно малую площадку  $dS$ , а потом проинтегрировали эту величину по площади поверхности лимитера. Соответственно, и для полоидальных, и для тороидальных лимитеров, а также для комбинаций основных видов подход будет тем же. Различия будут лишь в выражении  $\Delta(x_1, x_2)$ .

### 3.5. Кольцевой лимитер Т-11М

В целях проверки предположения о роли вторичных лимитеров в сборе эмитированного лития был спроектирован и изготовлен кольцевой лимитер. Он



размещается в тени рельсового «вольфрам-литиевого» лимитера и повёрнут на  $90^\circ$  относительно плазменного тора. Лимитер пересекает все магнитные поверхности с  $a = 0,24$  до  $0,21$  м ( $a$  — расстояние от центра плазмы). При такой конфигурации лимитеров можно осуществить принцип литиевого эмиттера-коллектора, в котором в роли эмиттера выступает рельсовый вольфрам-литиевый лимитер, а в роли коллектора — размещённый в его тени кольцевой. На Рисунке 3.9 приведена схема такой конфигурации. На Рисунке 3.10 показано размещение кольцевого лимитера в камере токамака T-11M относительно плазмы, SOL и силовых линий магнитного поля. Основные технические характеристики кольцевого лимитера, закладываемые при проектировании, сведены в Таблице 4.

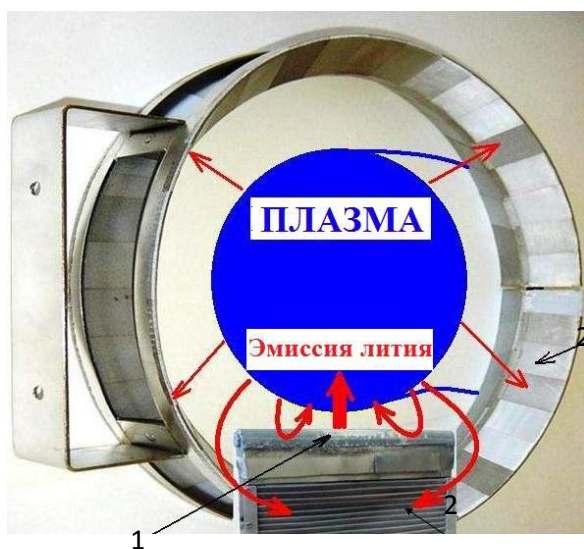


Рисунок 3.9. Схема реализации принципа литиевого эмиттера-коллектора с помощью кольцевого и горизонтального лимитеров: 1 — эмиттер лития, 2 — коллектор лития

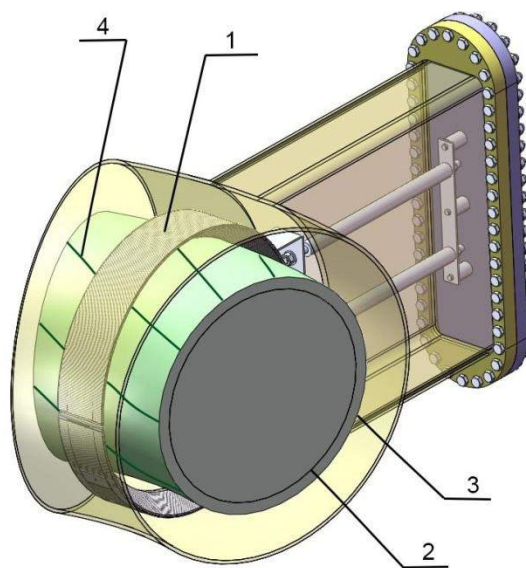


Рисунок 3.10. Размещение кольцевого лимитера в камере токамака относительно плазменного шнура: 1 — кольцевой лимитер, 2 — граница плазмы, 3 — граница поверхности, отстоящая на  $\lambda$  от границы плазмы, 4 — траектории заряженных частиц и силовые линии магнитного поля

Таблица 4.

## Основные характеристики кольцевого лимитера

Параметр	Величина
Исходная/рабочая температура собирающей поверхности, °С	$\geq 20/\leq 550$
Количество собирающих элементов, шт.	36
Максимальная площадь собирающей поверхности, см <sup>2</sup>	~1400
Проходное сечение антенного патрубка (Ш×В), мм	120×480
Внутренний диаметр собирающей поверхности, мм	420
Внешний диаметр собирающей поверхности, мм	478
Ширина лимитера, мм	89

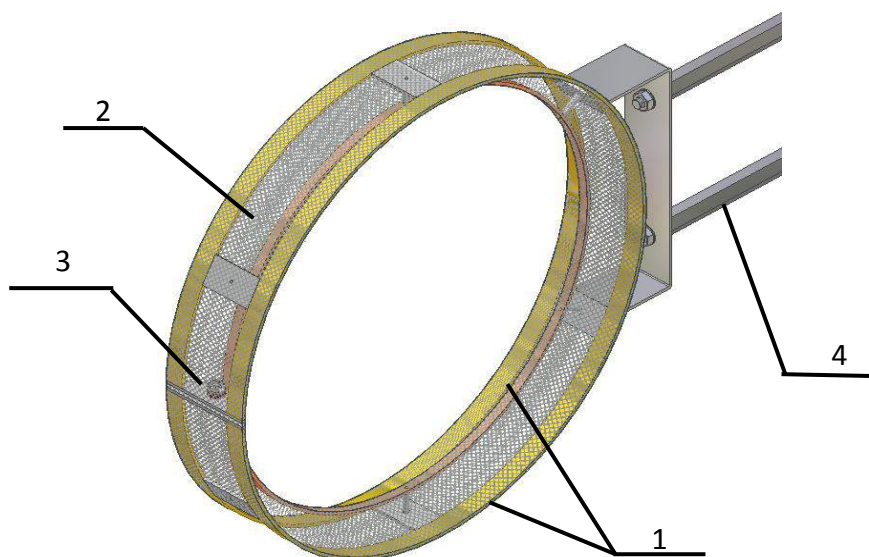


Рисунок 3.11. Устройство кольцевого лимитера: 1 – элементы каркаса, 2 – собирающая поверхность, 3 – электроизолирующая проставка, 4 – элементы крепления

Спроектированное устройство представлено на Рисунке 3.11. Лимитер является полоидальным и представляет собой кольцевой каркас, обтянутый собирающими элементами из капиллярно-пористой структуры. Основным

конструкционным материалом кольцевой диафрагмы является нержавеющая сталь аустенитного класса типа X18H10T.

Для изготовления собирающих элементов лимитера была выбрана сетка из нержавеющей стали 03X19H11ВИ с эффективным радиусом пор 30 мкм (Рисунок 3.3). Для предотвращения протекания токов Фуко предусмотрена электрическая развязка, которая «разрывает» кольцевой контур. Основным электроизолирующим материалом выбрана керамика. Керамические шайбы были установлены так, чтобы минимизировать вероятность попадания на них лития.

### 3.5.1. Тепловой расчёт кольцевого лимитера

Данное устройство в токамаке выполняет роль коллектора лития, поэтому эффективность его работы тем выше, чем ниже температура его поверхности. В связи с этим кольцевому лимитеру не требуется начальный нагрев до температуры плавления лития и расчёт начального теплового состояния не нужен. Проведём расчёт теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой. Как уже говорилось выше, данный лимитер будет работать в паре с горизонтальным рельсовым литиевым лимитером. Последний имеет возможность радиального перемещения относительно центра плазмы в диапазоне 0,180...0,210 м, следовательно, кольцевой лимитер будет всегда находиться в его тени. Расчёт проводился для штатного положения рельсового лимитера ( $R_{pl} = 0,180$  м) в среде MathCad.

#### Исходные данные для расчёта:

Внутренний радиус кольцевого лимитера $r_1$ , м .....	0,210
Внешний радиус кольцевого лимитера $r_2$ , м.....	0,240
Тороидальный радиус плазмы $R_{Tor}$ , м.....	0,700
Радиус плазмы $R_{pl}$ , м.....	0,180

Характерная длина уменьшения теплового потока $\lambda$ , м.....	0,020
Полная мощность разряда в омическом режиме $P_{\text{разр}}$ , Вт.....	$10^5$
Угол наклона собирающей пов-ти к потоку частиц $\alpha$ .....	$33^\circ$
Длительность плазменного импульса $t_{\text{pl}}$ , с.....	0,200
Объёмная доля лития в КПС $\varepsilon_{\text{Li}}$ .....	0,35
Запас устойчивости токамака $q$ .....	2,9

Теплофизические параметры материала основы КПС (сталь 03Х19Н11ВИ):

Плотность $\rho_{\text{ss}}$ , кг/м <sup>3</sup> .....	7895
Теплопроводность $\lambda_{\text{ss}}$ , Вт/(м·К).....	16,5
Теплоёмкость $c_{\text{pss}}$ , Дж/ (кг·К).....	520

Теплофизические параметры лития:

Плотность $\rho_{\text{Li}}$ , кг/м <sup>3</sup> .....	535
Теплопроводность $\lambda_{\text{Li}}$ , Вт/(м·К).....	84,8
Теплоёмкость $c_{\text{pLi}}$ , Дж/ (кг·К).....	3570

Расчёт:

Введём координаты, характеризующие положение точки на приёмной поверхности лимитера. Для данной геометрии это:  $r$  — расстояние от центра оси плазмы до точки и угол  $\varphi$  — полоидальный угол плазмы. Подробная расчётная схема представлена на Рисунке 3.12.

Рассчитаем мощности от излучения плазмы и от частиц в SOL по формулам (3.13):

$$P_{\text{изл}} = 0,2 \cdot P_{\text{разр}} = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{ч}} = 0,8 \cdot P_{\text{разр}} = 8 \cdot 10^4 \text{ Вт}. \quad (3.31)$$

Принимая во внимание допущение №2 и, используя формулу (3.12), определим угол  $\theta$ :

$$\theta = 5,067^\circ. \quad (3.32)$$

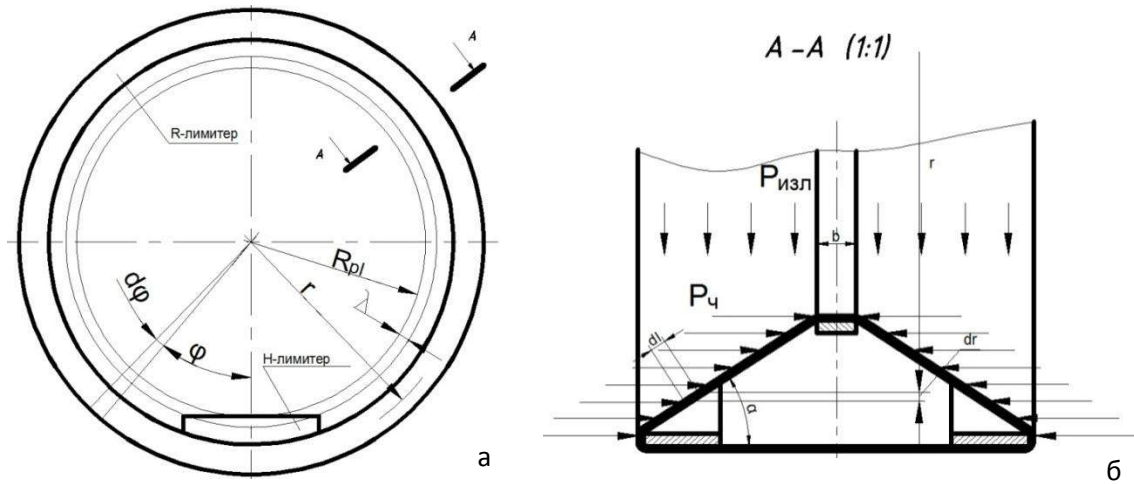


Рисунок 3.12. Расчётная схема: а — общий вид конфигурации лимитеров, Н-лимитер — горизонтальный, R-лимитер — кольцевой; б — сечение А-А

Составим выражения для тороидальной, полоидальной и радиальной составляющей плотности потока мощности по методике, описанной выше. Плотность потока от излучения плазмы (радиальная составляющая):

$$Q_{\text{изл}}(R_{pl}, \Delta) = \frac{P_{\text{изл}}}{4 \cdot \pi^2 \cdot R_{\text{Tor}} \cdot (R_{pl} + \Delta)} \cdot \cos \alpha. \quad (3.33)$$

Тороидальная составляющая плотности теплового потока от частиц в SOL:

$$Q_{\text{tor.i}}(\Delta) = \frac{1}{4} \cdot \frac{P_{\text{ч}}}{2 \cdot \pi \cdot R_{pl} \cdot \lambda} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda}\right) \cdot \sin \alpha;$$

$$Q_{\text{tor.e}}(\Delta) = \frac{3}{4} \cdot \frac{P_{\text{ч}}}{2 \cdot \pi \cdot R_{pl} \cdot \lambda} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda}\right) \cdot \sin \alpha. \quad (3.34)$$

Полоидальная составляющая плотности теплового потока от частиц в SOL будет равняться нулю, так как легко видеть, что в любой точке она направлена по касательной к поверхности:

$$Q_{\text{pol.i}} = Q_{\text{pol.e}} = 0. \quad (3.35)$$

Для данной геометрии  $\Delta$  принимает вид:

$$\Delta(r) = r - R_{pl}. \quad (3.36)$$

Согласно выражениям (3.23) распределение плотности мощности по поверхности лимитера:

$$\begin{aligned}
Q_{\Sigma i}(r) &= Q_{\text{изл}}(r) + Q_{\text{tor.i}}(r) + Q_{\text{pol.i}}; \\
Q_{\Sigma e}(r) &= Q_{\text{изл}}(r) + Q_{\text{tor.e}}(r) + Q_{\text{pol.e}}.
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Из (3.24) получаем выражение для полной мощности:

$$P = \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} (Q_{\Sigma i}(r) + Q_{\Sigma e}(r)) \cdot \frac{dr}{\sin(\alpha)} \cdot r \cdot d\varphi = 1,75 \cdot 10^4 \text{ Вт}. \tag{3.38}$$

Согласно выражению (3.25) скачок температуры за время разряда:

$$\begin{aligned}
\Delta T_i(r) &= 1,1 \frac{Q_{\Sigma i}(r) \sqrt{t_{pl}}}{\sqrt{\rho_{CPS} \lambda_{CPS} C_{p \text{ CPS}}}}; \\
\Delta T_e(r) &= 1,1 \frac{Q_{\Sigma e}(r) \sqrt{t_{pl}}}{\sqrt{\rho_{CPS} \lambda_{CPS} C_{p \text{ CPS}}}}.
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Учитывая, что КПС является композитным материалом, состоящим из пропитанной литием стальной сетки, определим интегральные теплофизические свойства КПС (плотность, теплопроводность и теплоёмкость) по формулам (3.6) – (3.8):

$$\rho_{CPS} = \rho_{Li} \cdot \varepsilon_{Li} + \rho_{ss} \cdot (1 - \varepsilon_{Li}) = 5,32 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \tag{3.40}$$

$$\lambda_{CPS} = \lambda_{Li} \cdot \varepsilon_{Li} + \lambda_{ss} \cdot (1 - \varepsilon_{Li}) = 40,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \tag{3.41}$$

$$C_{p \text{ CPS}} = C_{p \text{ Li}} \cdot \varepsilon_{Li} + C_{p \text{ ss}} \cdot (1 - \varepsilon_{Li}) = 1,59 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \tag{3.42}$$

Из выражения (3.26) рассчитаем полную площадь приёмной поверхности:

$$S = 2 \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\sin(\alpha)} \cdot r \cdot d\varphi = 1,56 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2. \tag{3.43}$$

Площадь эмиттерной зоны лимитера в зависимости от радиуса плазмы из выражения (3.27):

$$S_3 = 2 \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \Theta(\lambda - \Delta(x_1, x_2)) \frac{dr}{\sin(\alpha)} \cdot r \cdot d\varphi = 0. \tag{3.44}$$

Площадь коллекторной зоны по формуле (3.28):

$$S_k = 1,56 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2. \tag{3.45}$$

Соотношение площадей эмиттерной и коллекторных зон:

$$\mu = 0. \tag{3.46}$$

Полученный результат говорит, что лимитер не имеет эмиттерной зоны, то есть работает в штатном режиме как коллектор лития, что и закладывалось при проектировании.

Характерная глубина проникновения тепловой энергии по формуле (3.29):

$$X_T = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{CPS} \cdot t_{pl}}{\rho_{CPS} C_{p\ CPS}}} = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ м.} \quad (3.47)$$

Для проверки выполнения условия функционирования лимитера по температуре вычислим увеличение температуры за разряд в самой теплонапряжённой точке ( $r=0,210$  м, электронная сторона):

$$\Delta T_e(0,210) = 8,7^\circ\text{C} . \quad (3.48)$$

На Рисунке 3.13 показано распределение поверхностной плотности теплового потока на принимающую поверхность лимитера и увеличение температуры в зависимости от расстояния до центра плазмы, на Рисунке 3.14 — динамика изменения поверхностной температуры самой теплонапряжённой точки и распространения тепловой энергии вглубь материала. Все полученные результаты сведены в Таблице 5.

Выводы: скачок температуры за время плазменного импульса в самой теплонапряжённой точке составляет  $8,7^\circ\text{C}$ , что является малым значением для заданного диапазона температур (от  $20^\circ\text{C}$  до  $550^\circ\text{C}$ ). Полученная величина толщины проникновения тепловой энергии (0,9 мм) меньше толщины КПС (1 мм), что позволяет использовать допущение полубесконечной среды при расчёте температурного поля. При заданном значении радиуса плазмы ( $R_{pl}=0,180$  м) эмиттерной зоны лимитер не имеет, то есть он всецело выполняет роль коллектора.

Изготовленное устройство показано на Рисунке 3.15, перед установкой на токамак Т-11М — на Рисунке 3.16.

Таблица 5.

## Результаты теплового расчёта кольцевого лимитера

Величина	Значение
Мощность, приходящая на лимитер, Вт	$1,75 \cdot 10^4$
Площадь приёмной поверхности, $\text{м}^2$	$1,56 \cdot 10^{-1}$
Площадь эмиттерной зоны, $\text{м}^2$	0
Площадь коллекторной зоны, $\text{м}^2$	$1,56 \cdot 10^{-1}$
Отношение площадей эмиттерной и коллекторной зон	0
Увеличение температуры за разряд в самой теплонапряжённой точке лимитера, $^{\circ}\text{C}$	8,9
Глубина проникновения тепловой энергии, м	$8,8 \cdot 10^{-4}$

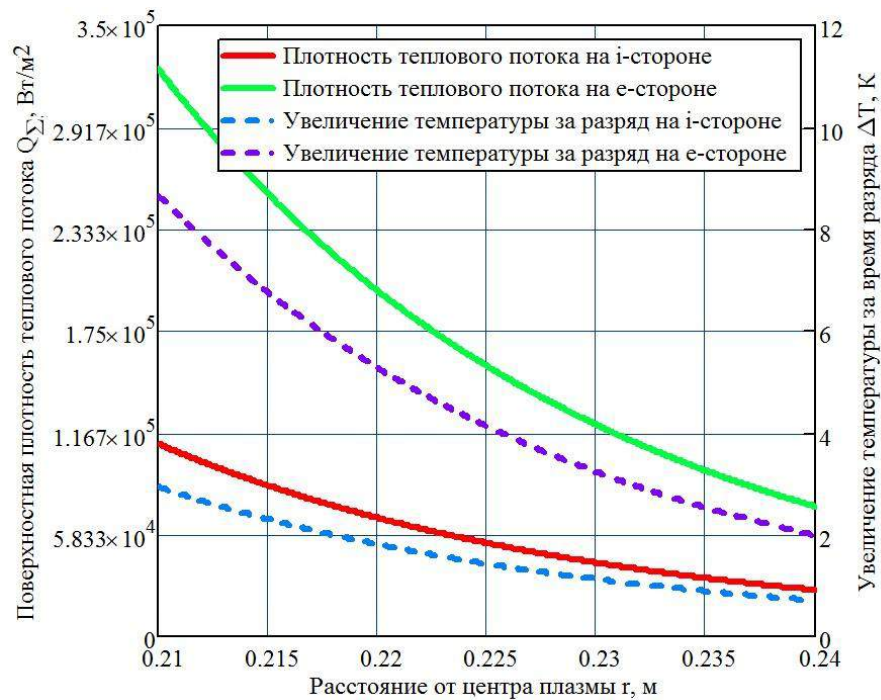


Рисунок 3.13. Распределение поверхностной плотности теплового потока на принимающую поверхность лимитера и увеличение температуры поверхности КПС за время разряда



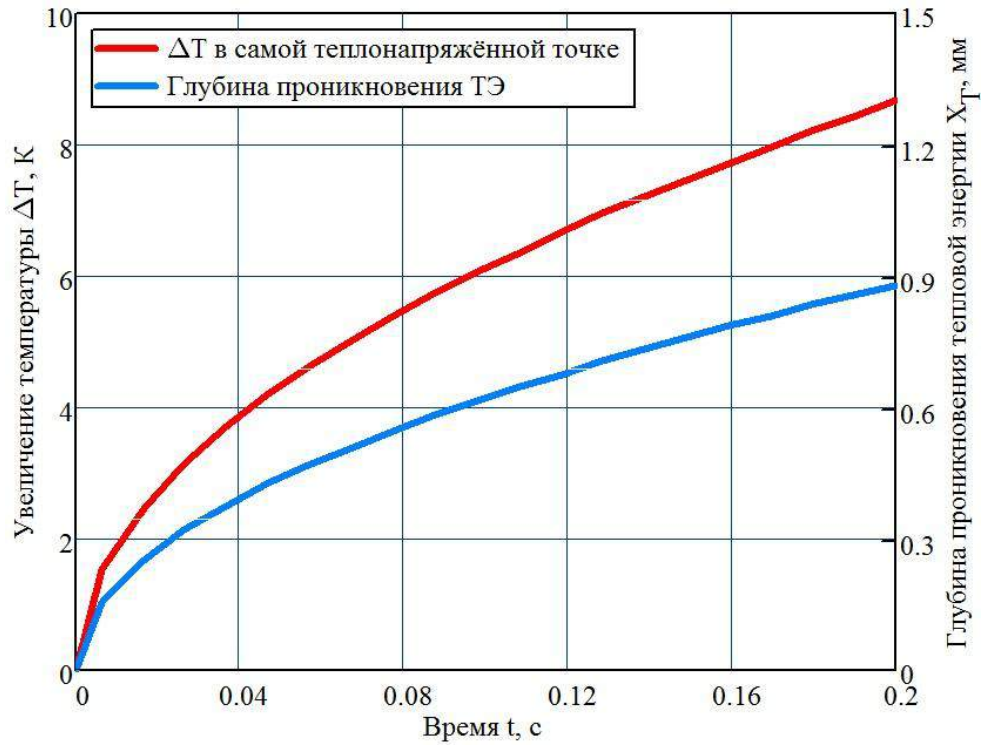


Рисунок 3.14. Увеличение температуры поверхности КПС в течение разряда в самой теплонпряжённой точке лимитера и глубина проникновения тепловой энергии

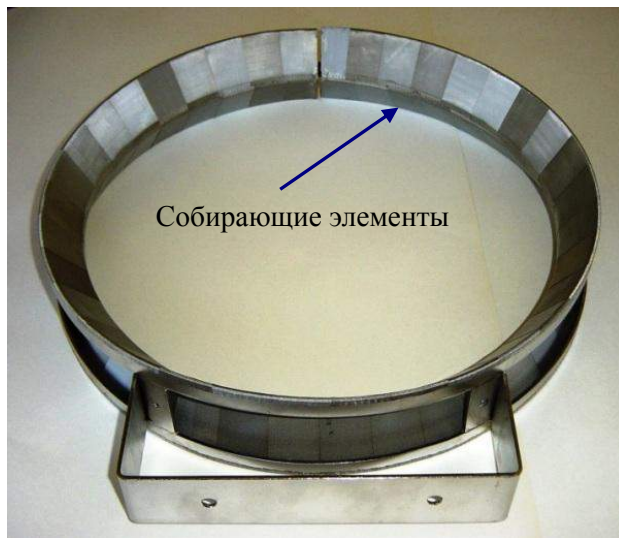


Рисунок 3.15. Изготовленный кольцевой лимитер



Рисунок 3.16. Установка кольцевого лимитера на токамак Т-11М

### 3.6. Вертикальный лимитер T-11M

В процессе экспериментов с кольцевым лимитером стал очевиден его главный недостаток — для транспортировки собранного лития и, соответственно, замыкания литиевой петли необходимо провести сложную процедуру его извлечения с последующей рекуперацией и возвращения в эмиттер. При этом необходимо разгерметизировать вакуумную камеру токамака, что надолго выводит установку из работы. Разумеется, в будущих стационарных токамаках-реакторах это недопустимо. Эти обстоятельства подтолкнули к поиску более технологичного решения транспортировки лития. После проработки всех решений были отобраны два варианта:

- 1) Организация бадминтонной модели транспортировки лития (рисунок 1.13б), в которой имеются два идентичных или почти идентичных литиевых лимитера с возможностью менять своё положение относительно центра плазмы от разряда к разряду. Таким образом, лимитеры попеременно выступают в роли то эмиттера, то коллектора лития.
- 2) Создание протяжённого лимитера, центральная часть которого соприкасается с горячей плазмой и выступает в роли эмиттера лития, а холодные концы выступают в роли коллектора. Транспортной системой в таком лимитере может выступать КПС.

Очевидно, что создание протяжённого литиевого лимитера отвечает обоим вариантам решения проблемы. Проблемой, ставшей на пути реализации проекта, стал выбор местоположения лимитера в камере. Нижние патрубки были слишком малы для нового лимитера, так как их проходное сечение позволяло установить только рельсовый лимитер, размер которого не удовлетворял концепции литиевого эмиттера-коллектора. После тщательного анализа возможных мест выбор был остановлен на антенном патрубке, где был установлен кольцевой лимитер. Размеры патрубка позволяли изготовить

лимитер протяжённостью до 400 мм, однако лимитер должен был быть вертикальным, что на этапе проектирования вызвало опасения относительно удержания лития КПС. На Рисунке 3.17 показано размещение вертикального лимитера в камере токамака T-11M относительно плазмы и силовых линий магнитного поля. Как можно видеть на Рисунке 3.17 концы приёмной поверхности далеко отстоят от плазмы токамака. На Рисунке 3.18 проиллюстрирована реализация концепции литиевого эмиттера-коллектора с помощью лимитера вертикального исполнения. Основные технические характеристики вертикального лимитера сведены в Таблицу 6.

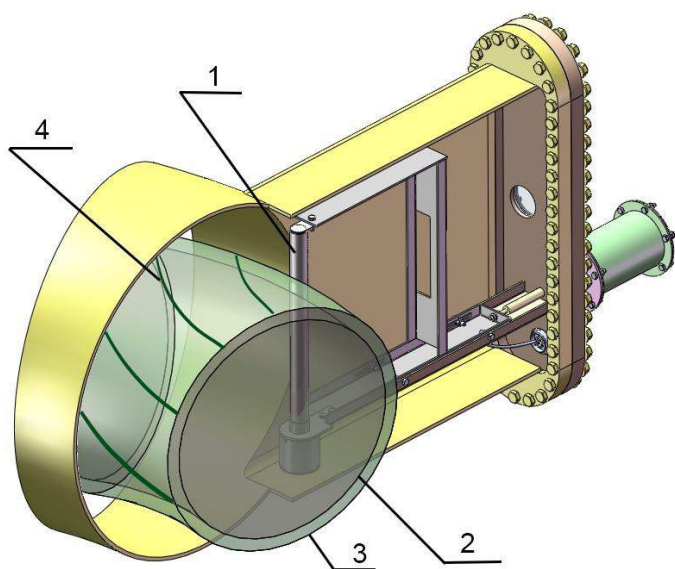


Рисунок 3.17. Размещение кольцевого лимитера в камере токамака относительно плазменного шнура: 1 – вертикальный лимитер, 2 – граница плазмы, 3 – граница поверхности, отстоящая на  $\lambda$  от границы плазмы, 4 – траектории заряженных частиц и силовые линии магнитного поля

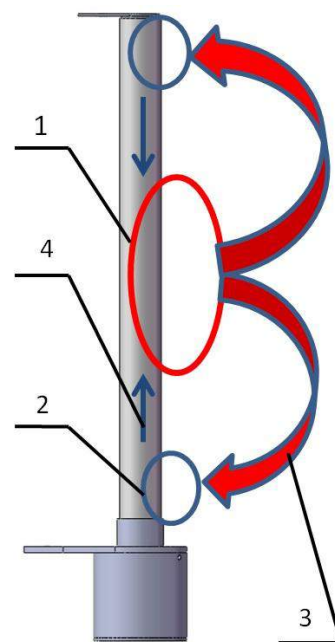


Рисунок 3.18. Реализация концепции литиевого эмиттера-коллектора с помощью вертикального лимитера: 1 – зона эмиттера, 2 – зона коллектора, 3 – потоки лития в плазме, 4 – потоки лития в КПС

Таблица 6.

## Основные характеристики вертикального лимитера

Параметр	Величина
Температурный диапазон работы устройства, °С	200 – 550
Длина приёмной поверхности, мм.	320
Диаметр литиевой приемной поверхности, мм	27
Площадь поверхности взаимодействия с плазмой, см <sup>2</sup>	~ 150
Максимальная площадь открытой литиевой поверхности, см <sup>2</sup>	~ 270
Количество точек термометрирования	3
Минимальный запас лития, г	30
Ход лимитера по малому радиусу токамака, мм	0 – 40

Основной компонент лимитера — литиевый приёмный элемент (Рисунок 3.19а, б). Литиевая поверхность приемного элемента лимитера имеет цилиндрическую форму и создается путем установки КПС на поверхность опорной трубы. Опорная труба аксиально вставлена в ёмкость подачи лития. КПС имеет гидравлический контакт с литием, находящимся в питающей ёмкости. В процессе работы капиллярные силы поднимают литий вверх по КПС и восполняют его потери. Во внутренней полости опорной трубы располагаются электрический нагреватель и термоэлектрические датчики контроля температуры [64, 65].

В процессе работы лимитера литиевая поверхность нагревается, и поэтому возникает необходимость эффективного отвода тепла от неё. Учитывая импульсный характер разряда и мощность, приходящую на лимитер, в качестве механизма теплоотвода был выбран механизм теплопроводности. Для обеспечения теплоотвода за счёт механизма теплопроводности предусмотрен тепловой аккумулятор в виде молибденовой проволоки, намотанной на опорную трубу (Рисунок 3.19в). Для дополнительной транспортировки лития вдоль опорной трубы на поверхность опорной трубы нанесены транспортные

каналы в виде винтовой канавки. В качестве материала внешнего слоя капиллярно-пористой системы лимитера, располагающегося на теплоаккумуляторе, выбрана сетка из нержавеющей стали 03Х19Н11ВИ с эффективным радиусом пор 30 мкм (Рисунок 3.3). В целях предотвращения протекания токов Фуко предусмотрена электрическая развязка, которая изолирует приёмный элемент от рамы. Основным электроизолирующим материалом выбрана керамика. Керамические шайбы установлены так, чтобы минимизировать вероятность попадания на них лития. Электрический нагреватель лимитера представляет собой проволоку из сплава ВР-20, продетую через керамические изоляторы и закреплённую на трубе, которая вставляется внутрь опорной трубы.

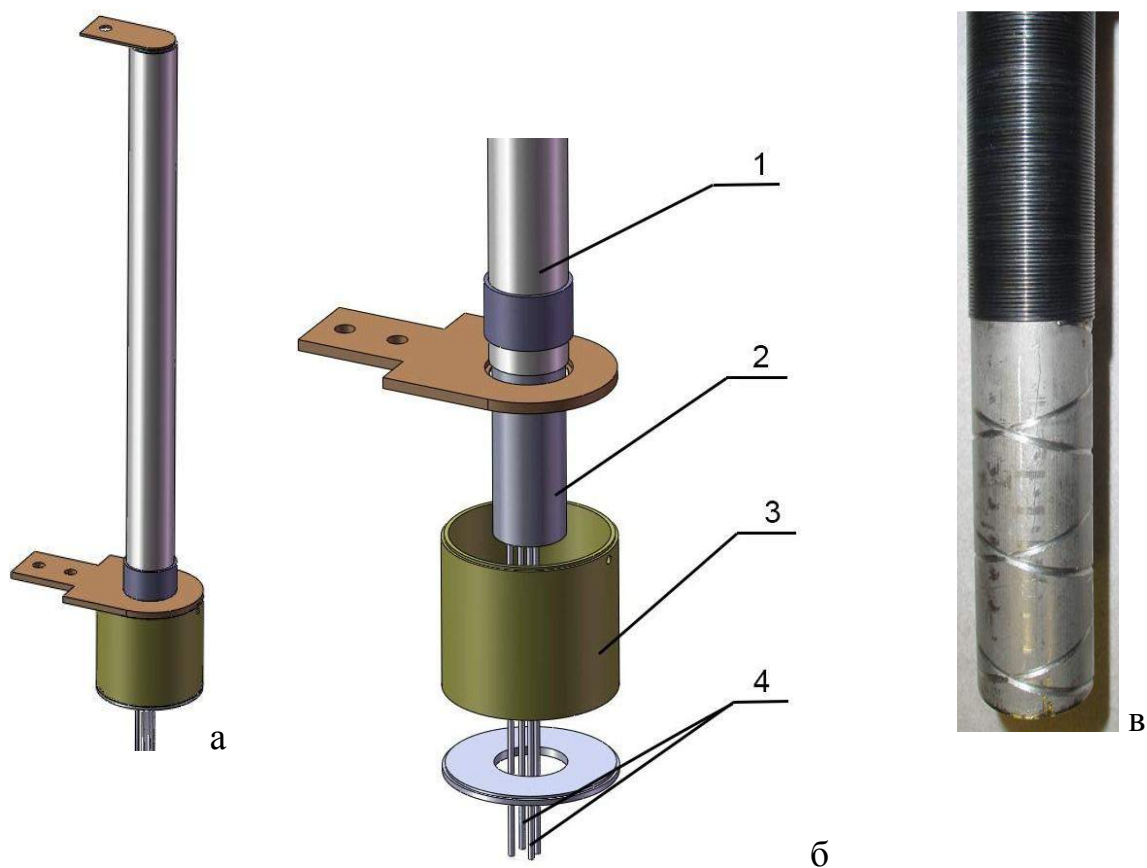


Рисунок 3.19. Литиевый приёмный элемент: а – общий вид, б – устройство, в – транспортные каналы и тепловой аккумулятор. На Рисунке 3.19б: 1 – пористый мат из КПС, 2 – опорная труба, 3 – бак подачи лития, 4 – электрический цепи нагревателя и термопар

Во избежание воздействия атмосферы на литий, находящийся в КПС, во время транспортировки лимитера предусмотрен специальный защитный экран, плотно установленный на литиевую поверхность лимитера (т.е. припаян жидким литием во время термообработки). После установки лимитера в вакуумную камеру токамака и её откачки экран снимается с помощью специального устройства.

### **3.6.1. Тепловой расчёт вертикального лимитера**

Как отмечалось выше, тепловое состояние лимитера один из главных критериев его работоспособности. В отличие от кольцевого лимитера, который выступает исключительно в роли коллектора лития, вертикальный лимитер выступает в роли и коллектора и эмиттера. Этим обуславливается нижний температурный предел работоспособности устройства ( $200^{\circ}\text{C}$ ): для получения самовосстанавливающейся поверхности литий должен быть в жидкой фазе, температура плавления лития  $T_{\text{пл}}=180,6^{\circ}\text{C}$ . Температура  $200^{\circ}\text{C}$  обеспечивается встроенным электрическим нагревателем. Тепловой расчёт будем проводить в два этапа: расчёт начального теплового состояния и расчёт теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой. Основная методика теплового описана выше.

#### **3.6.1.1. Расчёт начального теплового состояния лимитера**

Начальное тепловое состояние лимитера — тепловое состояние устройства непосредственно перед плазменным импульсом. Распределение температур в этом случае должно быть таковым, чтобы обеспечить нахождение лития в жидкой фазе в любой точке лимитера. Данное условие выполняется благодаря наличию электрического нагревателя, находящегося внутри опорной трубы. Цель данного расчёта — определить минимальную тепловую мощность

нагревателя, при которой выполняется это условие. Расчёт будет проводиться в системе CosmosFlowWorks методом конечных элементов. Задание теплового распределения в данной системе представляется затруднительным, поэтому будем проводить расчёт итерационным методом, задавая величину мощности нагревателя  $P$ , начиная с 50 Вт с шагом 10 Вт, до тех пор, пока не будет получено необходимое температурное распределение. Расчётная модель показана на Рисунке 3.20. Исходными данными для проведения расчёта

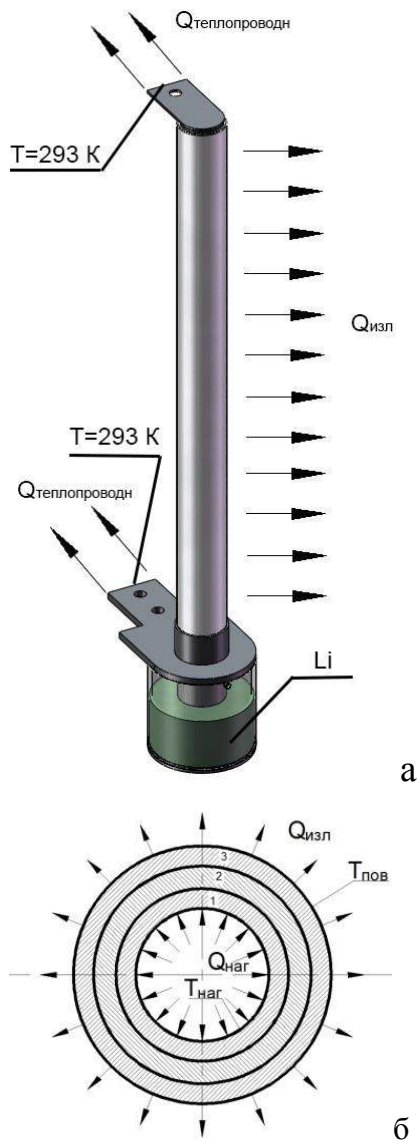


Рисунок 3.20. Схема теплового расчёта начального состояния: а – общий вид, б – поперечное сечение

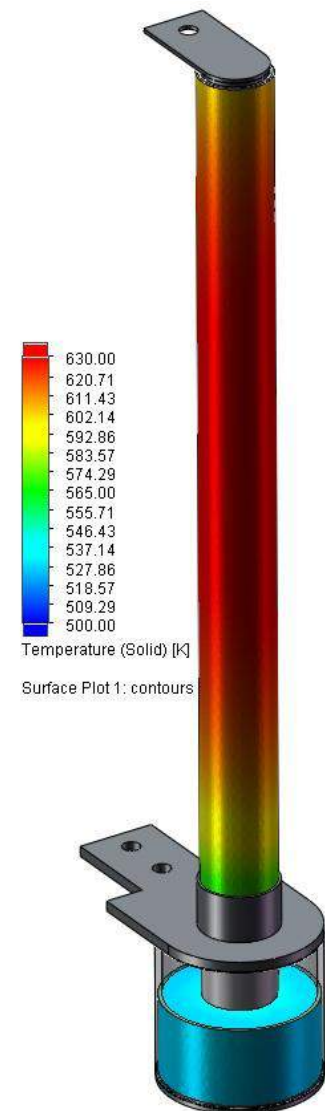


Рисунок 3.21. Начальное тепловое состояние лимитера при  $P=80$  Вт



являются геометрия устройства, теплофизические характеристики материалов лимитера и предполагаемая мощность нагревателя. Охлаждение в данной модели осуществляется излучением ( $\epsilon=0,2$ ) и теплопроводностью (торцовые поверхности кронштейнов играют роль тепловых стоков с постоянной температурой  $T=293^\circ\text{K}$ ). Необходимое распределение температуры с некоторым запасом по минимальной температуре было получено при  $P=80$  Вт. Результаты расчёта представлены на Рисунке 3.21. Видно, что минимальная температура лития в баке  $T \approx 530^\circ\text{K}$ , что на  $50^\circ$  выше его температуры плавления. Максимальная температура литиевой поверхности:  $T \approx 630^\circ\text{K} = 357^\circ\text{C} < 550^\circ\text{C}$ , что удовлетворяет условиям работы устройства. Следовательно, нагреватель мощностью 80 Вт обеспечивает требуемое тепловое состояние устройства.

### 3.6.1.2. Расчёт теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой

#### Исходные данные для расчёта:

Радиус плазмы $R_{pl}$ , м .....	0,180
Тороидальный радиус плазмы $R_{Tor}$ .....	0,700
Характерная длина уменьшения теплового потока $\lambda$ , м.....	0,020
Полная мощность разряда в омическом режиме $P_{разр}$ , Вт.....	$10^5$
Радиус приёмной поверхности лимитера $a$ , м.....	0,145
Длительность плазменного импульса $t_{pl}$ , с.....	0,200
Объёмная доля лития в КПС $\epsilon_{Li}$ .....	0,35
Запас устойчивости $q$ .....	2,9

#### Теплофизические параметры материала основы КПС (сталь 03X19H11ВИ):

Плотность $\rho_{ss}$ , кг/м <sup>3</sup> .....	7895
Теплопроводность $\lambda_{ss}$ , Вт/(м·К).....	16,5
Теплоёмкость $c_{pss}$ , Дж/ (кг·К).....	520



Теплофизические параметры лития:

Плотность $\rho_{Li}$ , кг/м <sup>3</sup> .....	535
Теплопроводность $\lambda_{Li}$ , Вт/(м·К).....	84,8
Теплоёмкость $c_{pLi}$ , Дж/ (кг·К).....	3570

Расчёт

Введём координаты, характеризующие положение точки на приёмной поверхности лимитера. Для данной геометрии это: угол  $\alpha$  — центральный угол лимитера и угол  $\varphi$  — полоидальный угол плазмы. Расчёт проводился в среде MathCad. Подробная расчётная схема представлена на Рисунке 3.22.

Рассчитаем мощности от излучения плазмы и от частиц в SOL по формулам (3.13):

$$P_{изл} = 0,2 \cdot P_{разр} = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{ч}} = 0,8 \cdot P_{разр} = 8 \cdot 10^4 \text{ Вт.} \quad (3.49)$$

Принимая во внимание допущение №2 и, используя формулу (3.12), определим угол  $\theta$ :

$$\theta = 5,067^\circ. \quad (3.50)$$

Расстояние по  $r$  от вершины лимитера до текущей т.А (Рисунок 3.22б):

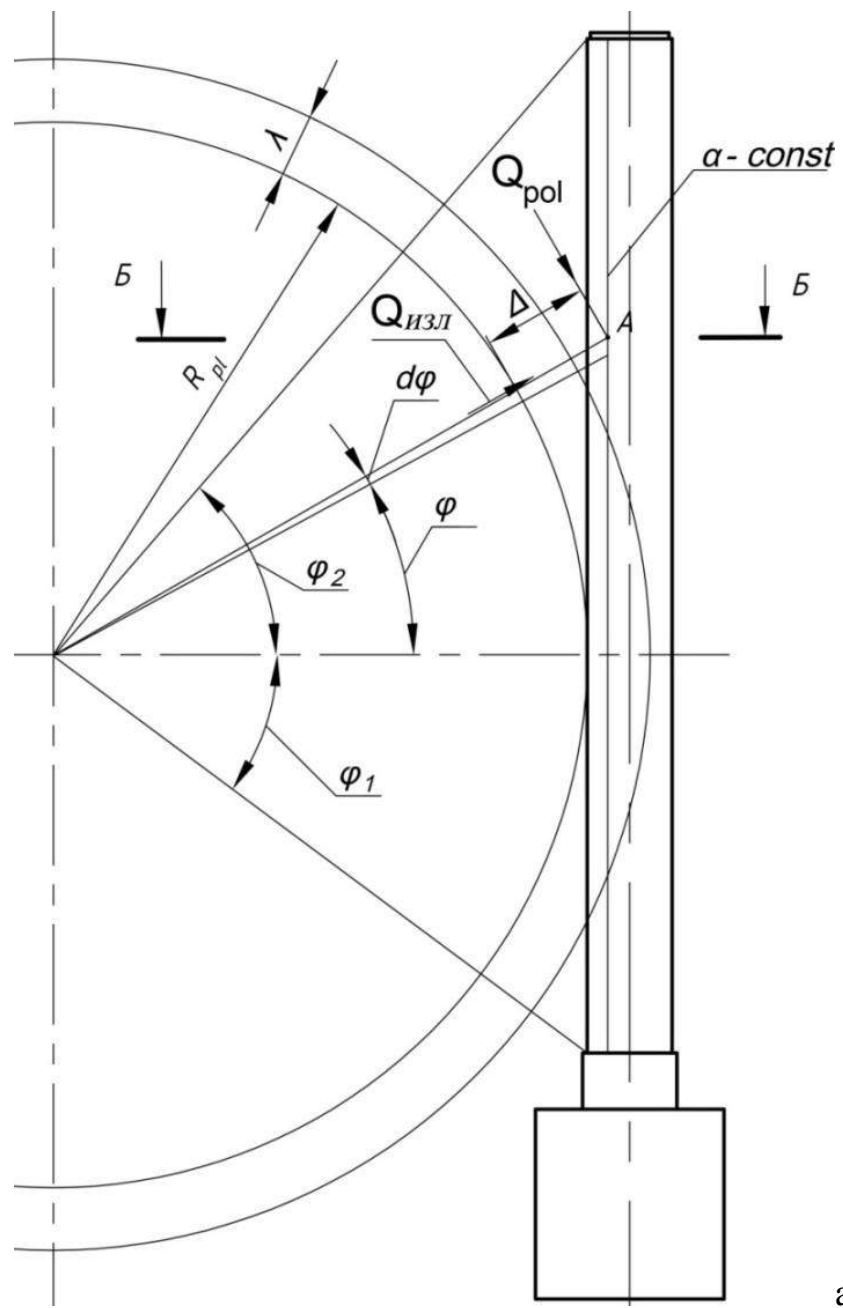
$$X(\alpha) = a \cdot (1 - \cos \alpha). \quad (3.51)$$

Расстояние от периферии плазмы до текущей т. А на поверхности лимитера с координатами  $\alpha$  и  $\varphi$  (Рисунок 3.22а):

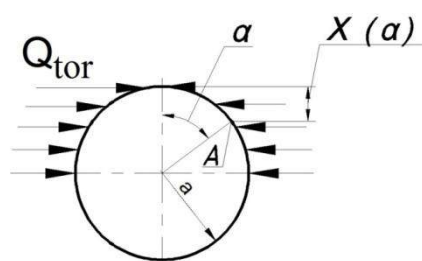
$$\Delta(\alpha, \varphi) = \frac{R_{pl} + X(\alpha)}{\cos \varphi} - R_{pl}. \quad (3.52)$$

Составим выражения для тороидальной, полоидальной и радиальной составляющей плотности потока мощности по методике, описанной выше. Плотность потока от излучения плазмы (радиальная составляющая):

$$Q_{изл}(\alpha, \varphi) = \frac{P_{изл}}{4 \cdot \pi^2 \cdot R_{Tor} \cdot (R_{pl} + \Delta(\alpha, \varphi))} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi. \quad (3.53)$$



а



б

Рисунок 3.22. Расчётная схема: а – общий вид лимитера, б – поперечное сечение Б-Б приёмной поверхности лимитер

Сторона лимитера (ионная или электронная) в данном математическом описании определяется знаком координаты  $\alpha$ . Для ионной стороны  $\alpha < 0$ , для электронной  $\alpha > 0$ . Тогда тороидальная составляющая плотности теплового потока от частиц в SOL:

$$Q_{tor}(\alpha, \varphi) = \begin{cases} \frac{3}{4} \cdot \frac{P_q}{2\pi R_{pl}\lambda} \exp\left(-\frac{\Delta(\alpha, \varphi)}{\lambda}\right) \sin \alpha, & \text{при } \alpha > 0; \\ \frac{1}{4} \cdot \frac{P_q}{2\pi R_{pl}\lambda} \exp\left(-\frac{\Delta(\alpha, \varphi)}{\lambda}\right) \sin \alpha, & \text{при } \alpha < 0. \end{cases} \quad (3.54)$$

Полоидальная составляющая плотности теплового потока от частиц в SOL:

$$Q_{pol}(\alpha, \varphi) = \begin{cases} \frac{3}{4} \cdot \frac{P_q}{2\pi R_{pl}\lambda} \exp\left(-\frac{\Delta(\alpha, \varphi)}{\lambda}\right) \sin \varphi \operatorname{tg} \theta \cos \alpha, & \text{при } \begin{cases} \alpha > 0 \\ \varphi > 0 \end{cases}; \\ \frac{1}{4} \cdot \frac{P_q}{2\pi R_{pl}\lambda} \exp\left(-\frac{\Delta(\alpha, \varphi)}{\lambda}\right) \sin \varphi \operatorname{tg} \theta \cos \alpha, & \text{при } \begin{cases} \alpha \leq 0 \\ \varphi \leq 0 \end{cases}. \end{cases} \quad (3.55)$$

Согласно выражению (3.23) распределение плотности мощности по поверхности лимитера:

$$Q_{\Sigma}(\alpha, \varphi) = Q_{изл}(\alpha, \varphi) + Q_{tor}(\alpha, \varphi) + Q_{pol}(\alpha, \varphi). \quad (3.56)$$

Из (3.24) получаем выражение для полной мощности:

$$P = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} Q_{\Sigma}(\alpha, \varphi) \cdot (\Delta(\alpha, \varphi) + R_{pl}) \cdot a \cdot d\alpha \cdot d\varphi, \quad (3.57)$$

где углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — минимальный и максимальный полоидальные углы плазмы, в диапазоне которых ведётся интегрирование (см. Рисунок 3.22а), углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — минимальный и максимальный центральные углы лимитера, в диапазоне которых ведётся интегрирование. Пределы интегрирования получаем из чертежа:

$$\varphi_1 = -\frac{37\pi}{180}; \varphi_2 = \frac{49\pi}{180}; \alpha_1 = -\frac{\pi}{2}; \alpha_2 = \frac{\pi}{2}. \quad (3.58)$$

Пределы интегрирования по  $\alpha$  получаем из предположения, что с плазмой взаимодействует только половина цилиндрической поверхности лимитера. Подставив пределы интегрирования, и проинтегрировав, получаем:

$$P = 5,53 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (3.59)$$

Согласно выражению (3.25) скачок температуры за время разряда:

$$\Delta T(\alpha, \varphi) = 1,1 \frac{Q_{\Sigma}(\alpha, \varphi) \sqrt{t_{pl}}}{\sqrt{\rho_{CPS} \lambda_{CPS} C_{p\ CPS}}}, \quad (3.60)$$

где в знаменателе стоят интегральные теплофизические характеристики КПС. Так как КПС вертикального лимитера полностью идентична КПС кольцевого лимитера, то значения характеристик возьмём из выражений (3.40) – (3.42).

Из выражения (3.26) рассчитаем полную площадь приёмной поверхности:

$$S = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (\Delta(\alpha, \varphi, a) + R_{pl}) \cdot a \cdot d\alpha \cdot d\varphi = 1,42 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2. \quad (3.61)$$

Площадь эмиттерной зоны по формуле (3.27):

$$\begin{aligned} S_{\Sigma} &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (\Delta(\alpha, \varphi, a) + R_{pl}) \cdot \Theta(\lambda - \Delta(\alpha, \varphi)) \cdot a \cdot d\alpha \cdot d\varphi = \\ &= 6,59 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Площадь коллекторной зоны по формуле (3.28):

$$S_{\kappa} = S - S_{\Sigma} = 7,61 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (3.63)$$

Соотношение площадей эмиттерной и коллекторной зон:

$$\mu = \frac{S_{\Sigma}}{S_{\kappa}} = 0,87. \quad (3.64)$$

Характерная глубина проникновения тепловой энергии по формуле (3.29):

$$X_T = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{CPS} \cdot t_{pl}}{\rho_{CPS} C_{p\ CPS}}} = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}. \quad (3.65)$$

Для проверки выполнения условия функционирования лимитера по температуре вычислим увеличение температуры за разряд в самой теплонапряжённой точке ( $\alpha \approx \pi/3$ ,  $\varphi = 0$ ):

$$\Delta T\left(\frac{\pi}{3}, 0\right) = 42,6^{\circ}\text{C}. \quad (3.48)$$

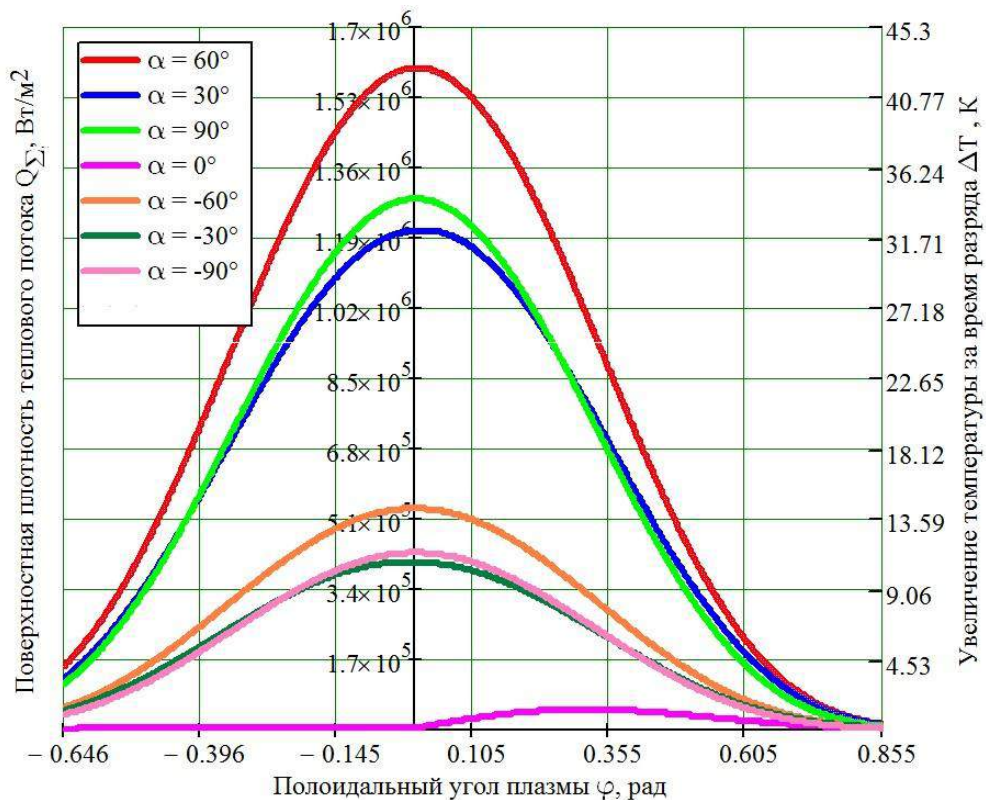
Все полученные результаты из системы MathCAD сведены в Таблице 7. На Рисунках 3.23, 3.24 показано распределение поверхностной плотности теплового потока на принимающую поверхность лимитера и увеличение

температуры в зависимости от полоидального угла плазмы и центрального угла лимитера, на Рисунке 3.25 — динамика изменения температуры самой теплонапряжённой точки лимитера и распространения тепловой энергии вглубь материала.

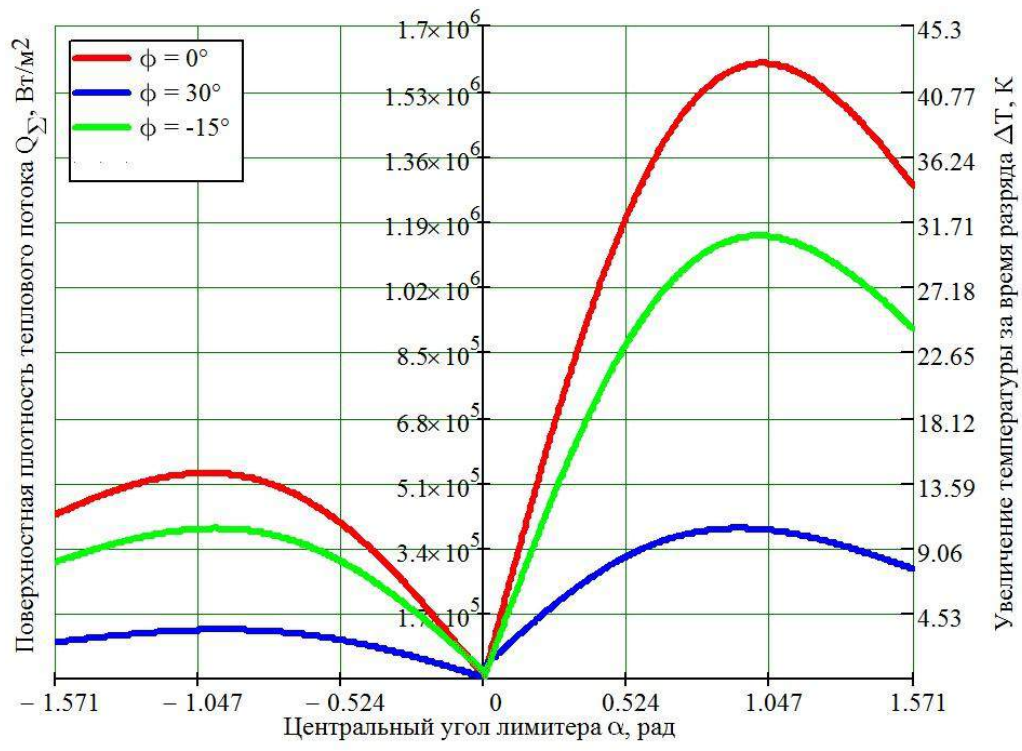
Таблица 7.

Результаты теплового расчёта вертикального лимитера

Параметр	Величина
Полная мощность, приходящая на лимитер, Вт	$5,53 \cdot 10^3$
Площадь приёмной поверхности, м <sup>2</sup>	$1,42 \cdot 10^{-2}$
Площадь эмиттерной зоны, м <sup>2</sup>	$6,59 \cdot 10^{-3}$
Площадь коллекторной зоны, м <sup>2</sup>	$7,61 \cdot 10^{-3}$
Отношение площадей эмиттерной и коллекторной зон	0,87
Увеличение температуры в самой теплонапряжённой точке лимитера за разряд, °С	42,6
Характерная глубина проникновения тепловой энергии, м	$8,8 \cdot 10^{-4}$



а



б

Рисунок 3.23. Распределение поверхностной плотности теплового потока на принимающую поверхность лимитера и увеличение температуры поверхности КПС за время разряда: а – при фиксированном значении  $\alpha$ , б –  $\phi$

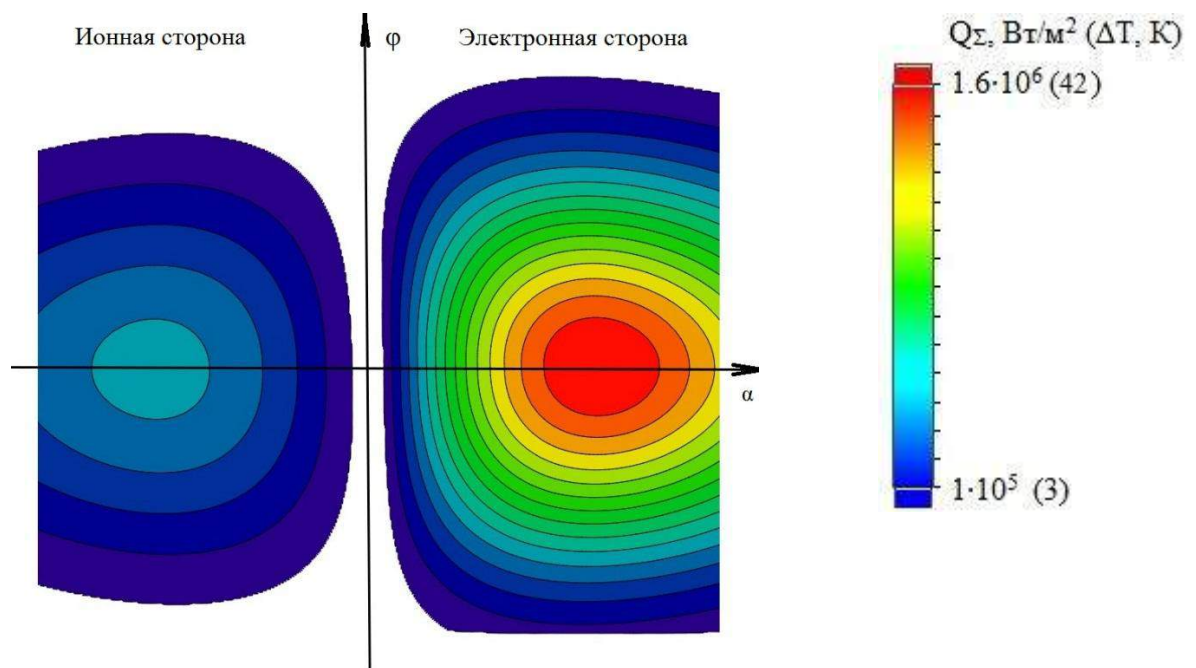


Рисунок 3.24. Диаграмма поверхностной плотности теплового потока на приёмную поверхность и увеличения температуры поверхности за разряд

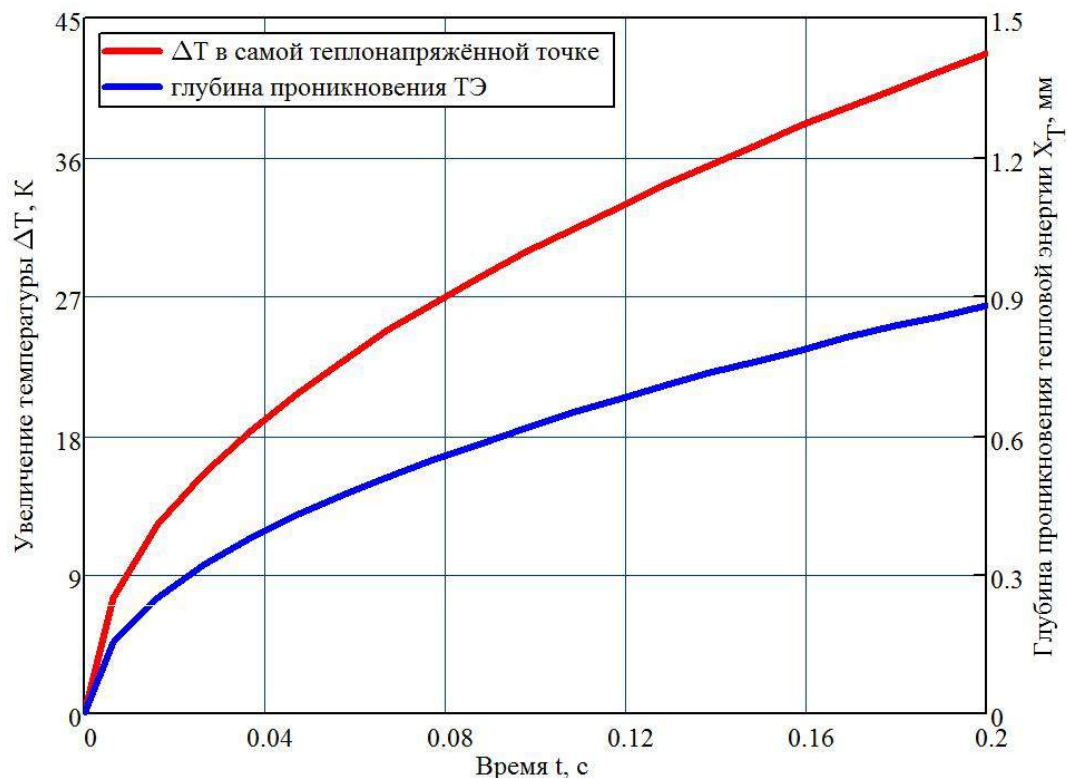


Рисунок 3.25. Увеличение температуры поверхности КПС в течение разряда в самой теплонапряжённой точке лимитера и глубина проникновения тепловой энергии

Выводы: из графиков видно, что наиболее теплонапряжённая точка имеет координаты  $\alpha \approx \pi/3$ ,  $\varphi = 0$ . Увеличение температуры данной точки КПС за разряд составляет  $42,6^\circ\text{C}$ , что является малым значением для заданного диапазона температур (от  $200^\circ\text{C}$  до  $550^\circ\text{C}$ ). Как видно из Рисунка 3.23а увеличение температуры в центральной зоне лимитера (зона эмиттера) намного больше увеличения температуры на концах (зона коллектора). Полученная величина толщины проникновения тепловой энергии (0,9 мм) меньше толщины КПС (1 мм), что позволяет использовать допущение полубесконечной среды при расчёте температурного поля. Можно утверждать, что с точки зрения теплового состояния данная конструкция работоспособна. Вид изготовленного лимитера показан на Рисунке 3.26.



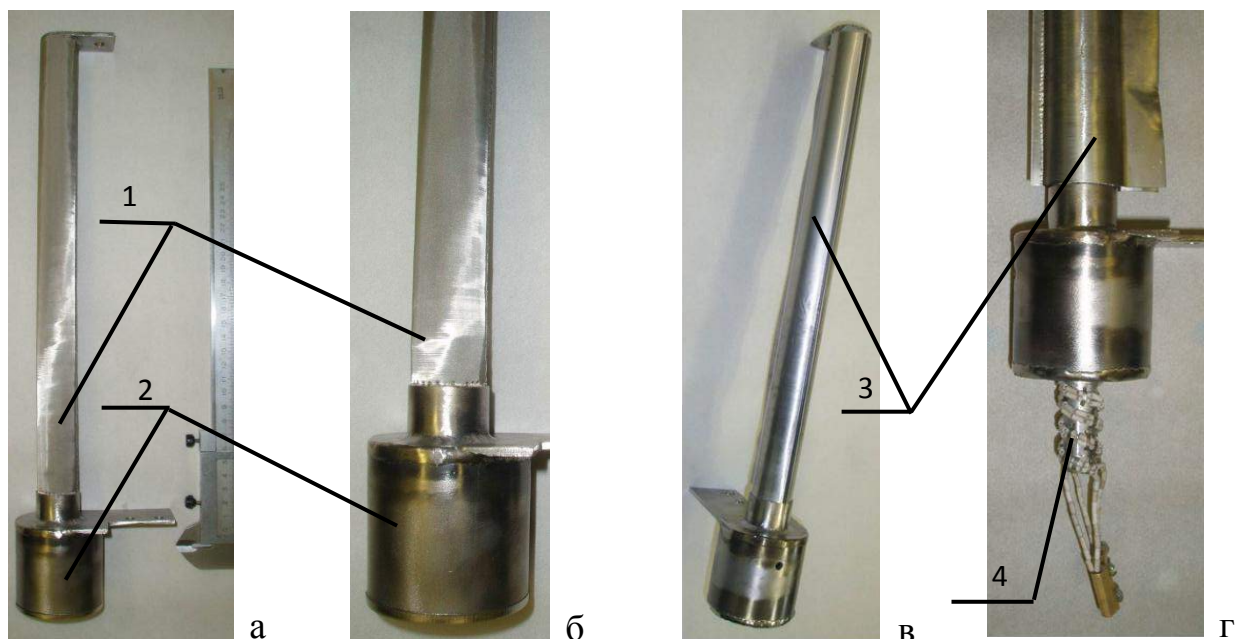


Рисунок 3.26. Вид изготовленного лимитера с (а,б) и без (в,г) защитного экрана: 1 – КПС, 2 – литиевый бак, 3 – защитный экран, 4 - нагреватель

### 3.7. Продольный лимитер Т-11М

Идея увеличения коллекторных зон с целью увеличения количества захваченного лития, и, следовательно, увеличения эффективности циркуляции лития стала логическим продолжением экспериментов по организации замкнутой литиевой петли с помощью вертикального лимитера. Создание более протяжённого лимитера (по сравнению с вертикальным) сопряжено с проблемой выбора его положения в камере. Очевидно, что единственное решение данной проблемы является размещение лимитера тангенциально к плазменному шнуру вдоль силовых линий магнитного поля. Расположение такого продольного лимитера относительно плазменного шнура, SOL и силовых линий в токамаке Т-11М показано на Рисунке 3.27. Реализация концепции литиевого эмиттера-коллектора осуществляется таким же образом как и в случае с вертикальным лимитером (Рисунок 3.18). Основные технические характеристики вертикального лимитера сведены в Таблицу 8.



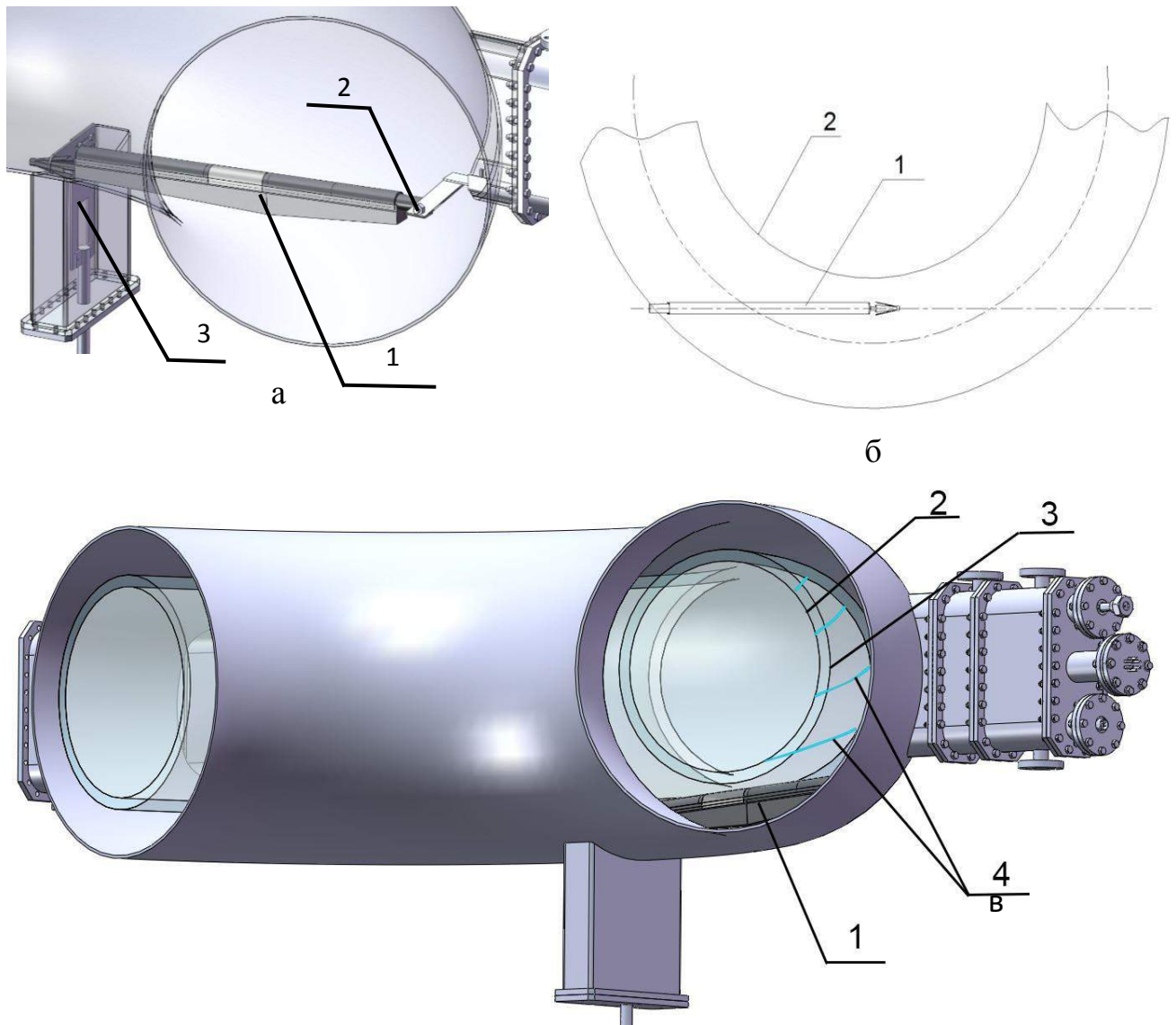


Рисунок 3.27. Продольный лимитер в камере токамака Т-11М: а – общий вид, б – схема расположения лимитера (вид сверху), в - размещение продольного лимитера в камере токамака относительно плазменного шнура. На Рисунке 3.27а: 1 – приёмный элемент, 2 – ось качения лимитера, 3 – подвижная опора. На Рисунках 3.27б, в: 1 – продольный лимитер, 2 – граница плазмы, 3 – граница поверхности, отстоящей на  $\lambda$  от границы плазмы, 4 – траектории заряженных частиц и силовые линии магнитного поля

Таблица 8.

## Основные характеристики продольного лимитера

Параметр	Величина
Температурный диапазон работы устройства, °С	200 – 550
Длина приёмной поверхности, мм.	590
Диаметр литиевой приемной поверхности, мм	32
Площадь поверхности взаимодействия с плазмой, см <sup>2</sup>	~ 300
Количество точек термометрирования	6
Минимальный запас лития, г	40

Основной компонент лимитера — литиевый приёмный элемент показан на Рисунке 3.28. Приёмная поверхность образована КПС установленной на тепловой аккумулятор из ниобия, который в свою очередь устанавливается на опорную трубу. Полученная конструкция крепится поверх ёмкости с литием так, что нижняя часть КПС попадает в ёмкость с литием. Во время работы лимитера литий посредством сил поверхностного натяжения равномерно смачивает всю приёмную поверхность лимитера. Для обеспечения теплоотвода за счёт механизма теплопроводности предусмотрен тепловой аккумулятор в виде ниобиевых цилиндров, установленных на опорную трубу. В качестве материала магистрального слоя капиллярно-пористой системы лимитера, располагающегося на теплоаккумуляторе как и в случае с кольцевым и вертикальным лимитерами выбрана сетка из нержавеющей стали 03X19H11ВИ с эффективным радиусом пор 30 мкм (Рисунок 3.3). Также для увеличения тепловой стойкости лимитера и во избежание повреждения основной магистральной КПС из стали были установлены пористые элементы из вольфрамового войлока. (Рисунок 3.4). Приёмный элемент имеет возможность перемещаться относительно оси, которая крепится неподвижно на кронштейне. Для жёсткой фиксации лимитера предусмотрен фиксатор, фиксирующий лимитер относительно подвижной опоры, положение которой задаёт радиус

плазмы (Рисунок 3.27а). В целях предотвращения протекания токов Фуко приёмный элемент крепится к оси через керамические изоляторы. Электрический нагреватель лимитера полностью идентичен нагревателю для вертикального лимитера (с точностью до электрических характеристик).

Во избежание воздействия атмосферы на литий, находящийся в КПС, во время транспортировки лимитера предусмотрен специальный защитный экран, который плотно установлен на принимающую поверхность лимитера (т.е. припаян жидким литием во время термообработки). Защитный экран продольного лимитера по конструкции немного отличается от экрана вертикального. Он состоит из 4х частей, покрывающих всю принимающую поверхность. Каждая часть соединена с тягой, которая выходит наружу через фланец. После прогрева лимитера до температуры плавления лития защитный экран тягами вручную вытягивается в антенный патрубок и остаётся там до последующей разгерметизации камеры.

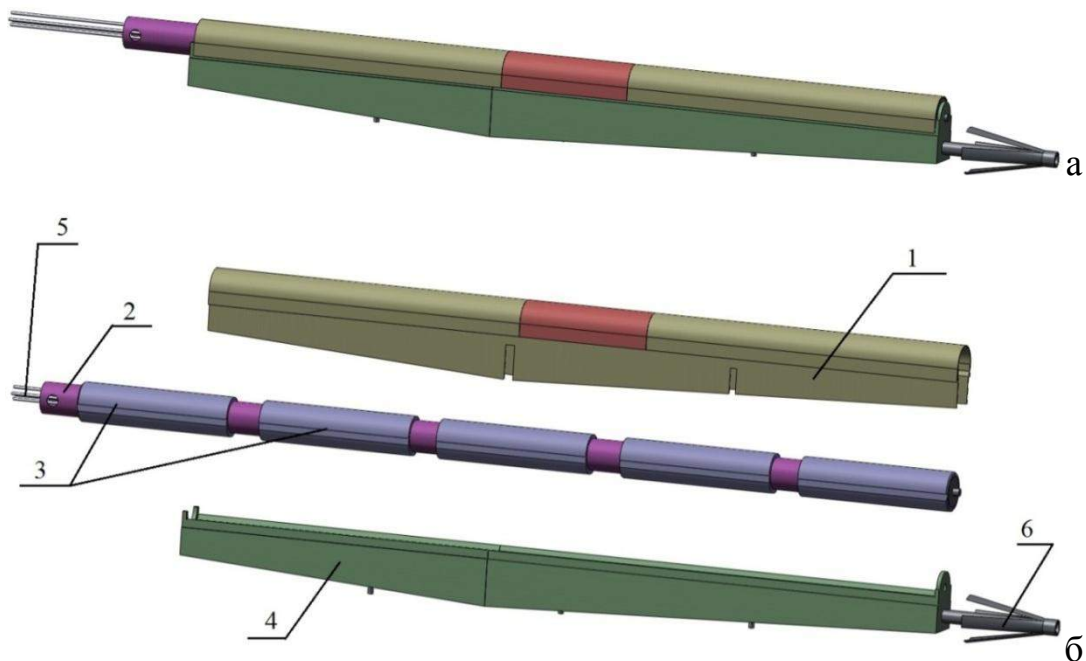


Рисунок 3.28. Литиевый приёмный элемент: а – общий вид, б – устройство. На Рисунке 3.28б: 1 – КПС, 2 – опорная труба, 3 – теплоаккумулятор, 4 – литиевая ёмкость, 5 – цепи нагревателя и термопар, 6 – фиксатор

### 3.7.1. Тепловой расчёт продольного лимитера

Продольный лимитер выступает в роли и коллектора и эмиттера. Этим обуславливается нижний температурный предел работоспособности устройства ( $200^{\circ}\text{C}$ ): для получения самовосстанавливающейся литиевой поверхности литий должен быть в жидкой фазе, температура плавления лития  $T_{\text{пл}}=180,6^{\circ}\text{C}$ . Температура  $200^{\circ}\text{C}$  обеспечивается встроенным электрическим нагревателем. Тепловой расчёт будем проводить в два этапа: расчёт начального теплового состояния и расчёт теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой. Основная методика теплового описана выше.

#### 3.7.1.1. Расчёт начального теплового состояния лимитера

Начальное тепловое состояние лимитера — тепловое состояние устройства непосредственно перед плазменным импульсом. Распределение температур в этом случае должно быть таковым, чтобы обеспечить нахождение лития в жидкой фазе в любой точке лимитера. Данное условие выполняется благодаря наличию электрического нагревателя, находящегося внутри опорной трубы. Цель данного расчёта — определить минимальную тепловую мощность нагревателя, при которой выполняется это условие. Расчёт будем проводить в системе CosmosFlowWorks методом конечных элементов. Задание теплового распределения в данной системе представляется затруднительным, поэтому будем проводить расчёт итерационным методом, задавая величину мощности нагревателя  $P$ , начиная с 50 Вт с шагом 10 Вт, до тех пор, пока не будет получено необходимое температурное распределение. Расчётная модель показана на Рисунке 3.29. Исходными данными для проведения расчёта являются геометрия устройства, теплофизические характеристики материалов лимитера и предполагаемая мощность нагревателя. Охлаждение в данной модели осуществляется излучением ( $\epsilon=0,2$ ) и теплопроводностью (торцовые

поверхности кронштейнов и фиксатора играют роль тепловых стоков с постоянной температурой  $T=293\text{K}$ ). Необходимое распределение температуры с некоторым запасом по минимальной температуре было получено при  $P=50$  Вт. Результаты расчёта представлены на Рисунке 3.30. Видно, что минимальная температура лития в баке  $T \approx 523\text{K}$ , что на  $50^\circ$  выше его температуры плавления. Максимальная температура литиевой поверхности:  $T \approx 570\text{K} = 297^\circ\text{C} < 550^\circ\text{C}$ , что удовлетворяет условиям работы устройства. Таким образом, можно заключить, что нагреватель мощностью в 50 Вт полностью обеспечивает требуемое начальное тепловое состояние лимитера.

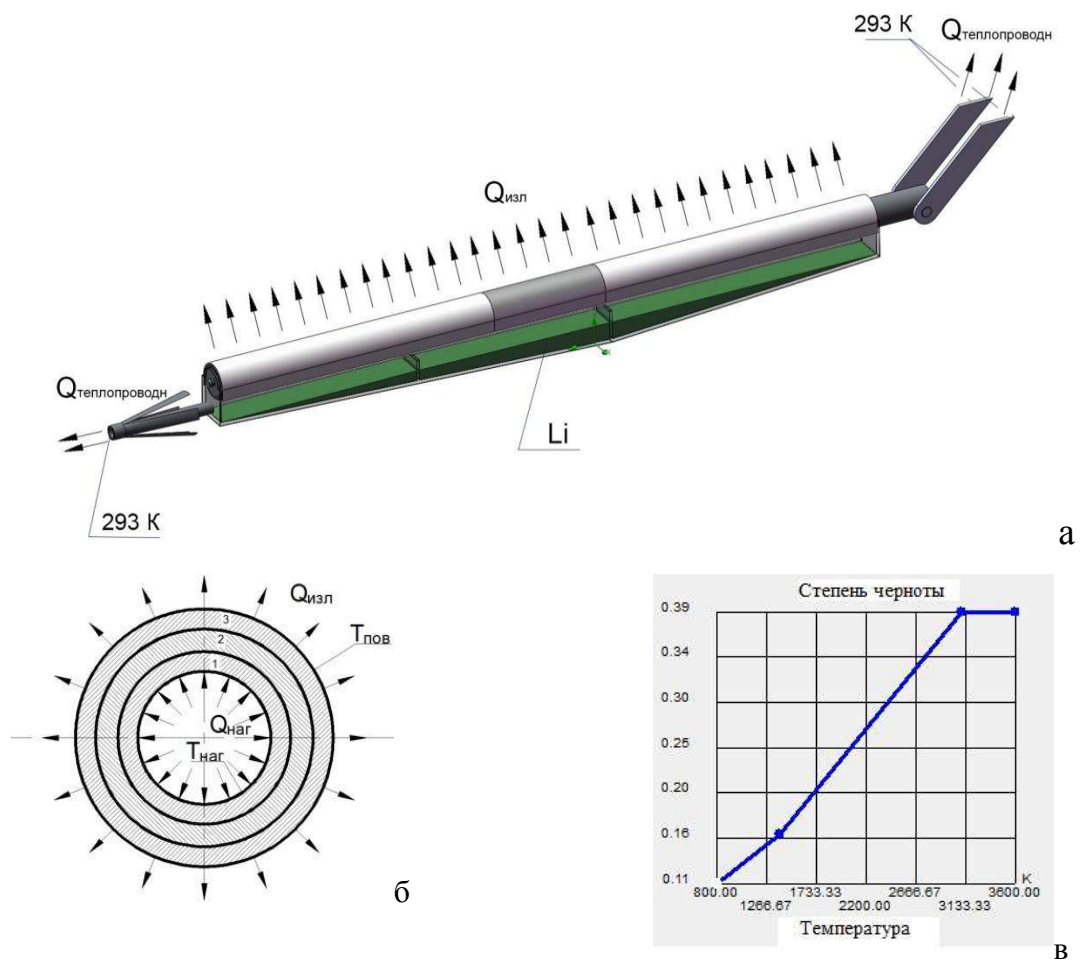


Рисунок 3.29. Схема теплового расчёта начального состояния: а – общий вид, б – поперечное сечение, в – зависимость степени черноты W-войлока от температуры

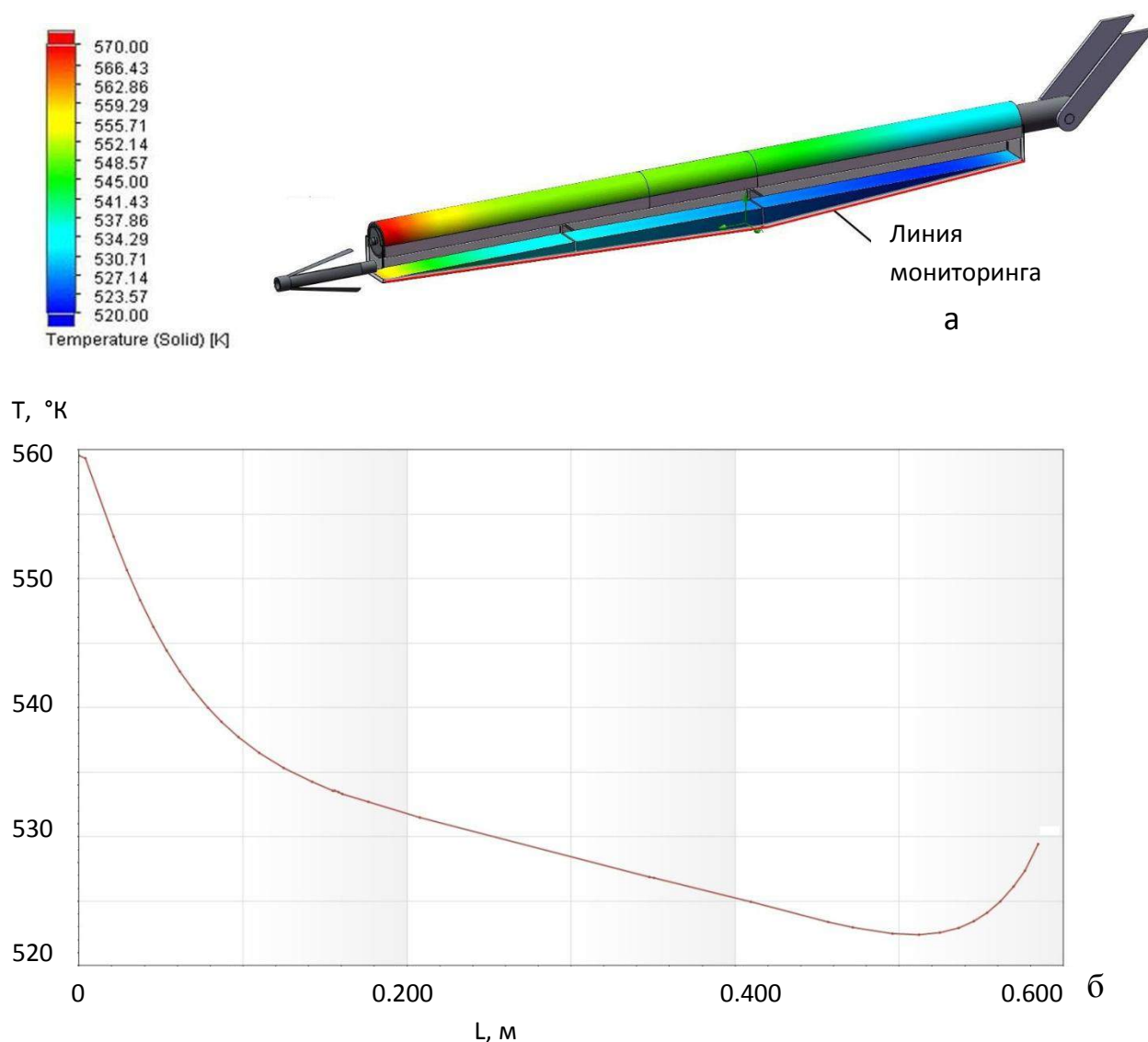


Рисунок 3.30. Начальное тепловое состояние лимитера при  $P=50$  Вт: а – температурное поле КПС и лития, б – температура лития вдоль линии мониторинга (начиная со стороны фиксатора),  $T_{\text{макс}} = 560^{\circ}\text{K}$ ,  $T_{\text{мин}} = 523^{\circ}\text{K}$

### 3.7.1.2. Расчёт теплового состояния лимитера при его взаимодействии с плазмой

Исходные данные для расчёта:

Радиус плазмы $R_{\text{pl}}$ , м .....	0,180
Тороидальный радиус плазмы $R_{\text{Tor}}$ .....	0,700
Характерная длина уменьшения теплового потока $\lambda$ , м.....	0,020

Полная мощность разряда в омическом режиме $P_{\text{разр}}$ , Вт.....	$10^5$
Радиус приёмной поверхности лимитера, а, м.....	0,145
Длительность плазменного импульса $t_{\text{pl}}$ , с.....	0,200
Объёмная доля лития в КПС $\varepsilon_{\text{Li}}$ .....	0,3
Запас устойчивости токамака $q$ .....	2,9

Теплофизические параметры лития:

Плотность $\rho_{\text{Li}}$ , кг/м <sup>3</sup> .....	535
Теплопроводность $\lambda_{\text{Li}}$ , Вт/(м·К).....	84,8
Теплоёмкость $c_{\text{pLi}}$ , Дж/ (кг·К).....	3570

Теплофизические параметры материала основы КПС (вольфрам):

Плотность $\rho_{\text{W}}$ , кг/м <sup>3</sup> .....	19250
Теплопроводность $\lambda_{\text{W}}$ , Вт/(м·К).....	170
Теплоёмкость $c_{\text{pW}}$ , Дж/ (кг·К).....	132

Расчёт:

Тепловой расчёт продольного лимитера будет проводиться такими же методами, что и расчёт вертикального, однако, ввиду его специфического расположения в камере токамака, будет сложнее, так как в данном случае нельзя использовать допущение №1 (лимитер протяжён в тороидальном направлении), к тому же сам же лимитер перпендикулярен оси токамака и немного опущен вниз. Последний факт легко нивелируется тем, что угол наклона невелик ( $\approx 4^\circ$ ) и условно можно считать, что ось лимитера перпендикулярна оси токамака. Касательная к оси плазмы в точке её пересечения с осью лимитера проходит под углом  $\gamma_0 = 32,5^\circ$  к оси лимитера. Введём координаты, характеризующие положение точки на приёмной поверхности лимитера. Для данной геометрии это: угол  $\alpha$  — центральный угол

лимитера и угол  $\gamma$  — тороидальный угол плазмы. Расчёт проводился в среде MathCad. Расчётная схема показана на Рисунке 3.31.

Рассчитаем мощности от излучения плазмы и от частиц в SOL по формулам (3.13):

$$P_{\text{изл}} = 0,2 \cdot P_{\text{разр}} = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{ч}} = 0,8 \cdot P_{\text{разр}} = 8 \cdot 10^4 \text{ Вт.} \quad (3.49)$$

Принимая во внимание допущение №2 и, используя формулу (3.12), определим угол  $\theta$ :

$$\theta = 5,067^\circ. \quad (3.50)$$

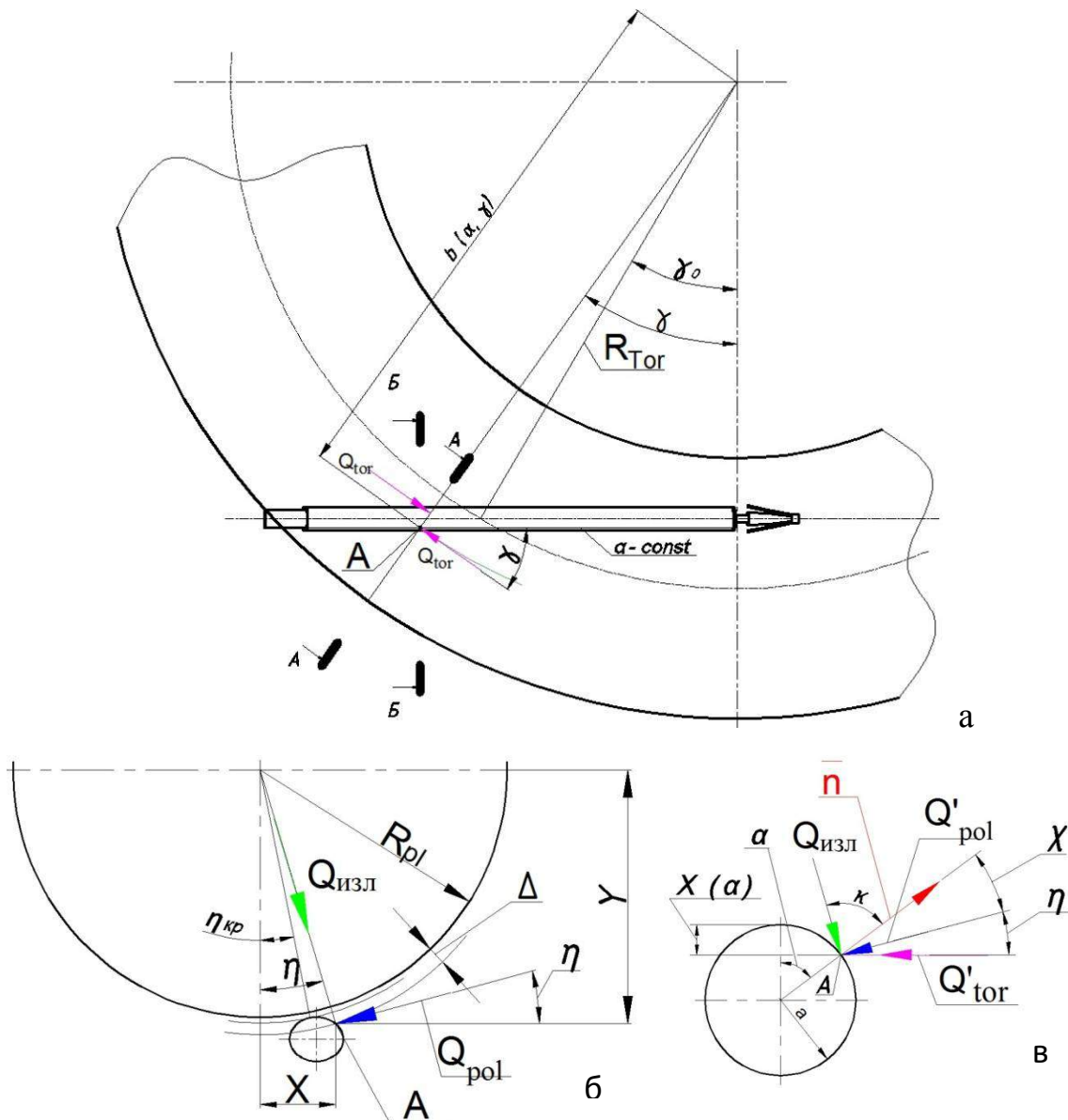


Рисунок 3.31. Расчётная схема



Расстояние по оси от вершины лимитера до текущей точки А (Рисунок 3.31в):

$$X(\alpha) = a \cdot (1 - \cos \alpha). \quad (3.69)$$

Составим выражение для расстояния  $\Delta$  от последней замкнутой магнитной поверхности, до произвольной точки приёмной поверхности с координатами  $\alpha$  и  $\gamma$  (т. А на Рисунке 3.31а):

$$b(\alpha, \gamma) = \frac{R_{Tor} \cdot \cos \gamma_0 + a \cdot \sin \alpha}{\cos \gamma}. \quad (3.70)$$

Из Рисунка 3.31б определим  $\Delta(\alpha, \gamma)$ :

$$\Delta(\alpha, \gamma) = \sqrt{X^2 + Y^2} - R_{pl} = \sqrt{(b(\alpha, \gamma) - R_{Tor})^2 + (R_{pl} + X(\alpha))^2} - R_{pl}. \quad (3.71)$$

Для определения полоидальной и радиальной составляющей теплового потока необходимо определить полоидальный угол  $\eta(\alpha, \gamma)$ . Из Рисунка 3.31б следует:

$$\eta(\alpha, \gamma) = \arctg \left( \frac{X}{Y} \right) = \arctg \left( \frac{b(\alpha, \gamma) - R_{Tor}}{R_{pl} + X(\alpha)} \right). \quad (3.72)$$

Также введём понятие критического полоидального угла  $\eta_{кр}$  — полоидальный угол, при котором луч ОА становится нормалью к поверхности лимитера. Его можно вычислить как:

$$\eta_{кр}(\gamma) = \arctg \left( \frac{R_{Tor}}{R_{pl} + a} \cdot \left( \frac{\cos \gamma_0}{\cos \gamma} - 1 \right) \right). \quad (3.73)$$

Сторона лимитера (ионная или электронная) в данном математическом описании определяется знаком координаты  $\alpha$ . Для ионной стороны  $\alpha > 0$ , для электронной  $\alpha < 0$ . Тогда тороидальная составляющая плотности теплового потока от частиц в SOL:

$$Q_{tor}(\alpha, \gamma) = \begin{cases} \frac{3}{4} \cdot \frac{P_q}{2\pi R_{pl} \lambda} \exp \left( -\frac{\Delta(\alpha, \gamma)}{\lambda} \right) \sin \alpha \sin \gamma & \text{при } \alpha < 0; \\ \frac{1}{4} \cdot \frac{P_q}{2\pi R_{pl} \lambda} \exp \left( -\frac{\Delta(\alpha, \gamma)}{\lambda} \right) \sin \alpha \sin \gamma & \text{при } \alpha > 0. \end{cases} \quad (3.74)$$

Для определения поверхностной плотности теплового потока от полоидальной составляющей необходимо знать угол  $\chi(\alpha, \gamma)$ , который можно определить по Рисунку 3.31в. Однако зависимость угла  $\chi(\alpha, \gamma)$  будет кусочной функцией, так

как в зависимости от угла  $\gamma$  будет меняться относительное положение нормали к поверхности  $n$  и направления полоидальной составляющей. Полоидальную составляющую можно записать следующим образом:

$$Q_{pol}(\alpha, \gamma) = \begin{cases} \frac{3}{4} \cdot \frac{P_q}{2\pi R_{pl}\lambda} \exp\left(-\frac{\Delta(\alpha, \gamma)}{\lambda}\right) \operatorname{tg} \theta \cos \gamma \cos \chi & \text{при } \alpha < 0; \\ \frac{1}{4} \cdot \frac{P_q}{2\pi R_{pl}\lambda} \exp\left(-\frac{\Delta(\alpha, \gamma)}{\lambda}\right) \operatorname{tg} \theta \cos \gamma \cos \chi & \text{при } \alpha > 0, \end{cases} \quad (3.75)$$

где

$$\chi(\alpha, \gamma) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - |\alpha| - |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } \alpha \geq 0 \text{ и } \eta > 0; \\ \frac{\pi}{2} + |\alpha| - |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } -\eta_{кр} < \alpha < 0 \text{ и } \eta > 0; \\ \frac{\pi}{2} - |\alpha| + |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } \alpha \leq -\eta_{кр} \text{ и } \eta > 0; \\ \frac{\pi}{2} - |\alpha| - |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } \alpha \leq 0 \text{ и } \eta < 0; \\ \frac{\pi}{2} + |\alpha| - |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } 0 < \alpha < -\eta_{кр} \text{ и } \eta < 0; \\ \frac{\pi}{2} - |\alpha| + |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } \alpha \geq -\eta_{кр} \text{ и } \eta < 0; \\ \frac{\pi}{2} - |\alpha|, & \text{если } \eta = 0. \end{cases} \quad (3.76)$$

Аналогично для теплового потока от радиальной составляющей угол  $\kappa(\alpha, \gamma)$  — кусочная функция. Поэтому:

$$Q_{изл}(\alpha, \gamma) = \frac{P_{изл}}{4 \cdot \pi^2 \cdot R_{Tor} \cdot (R_{pl} + \Delta(\alpha, \varphi))} \cdot \cos \kappa(\alpha, \gamma) \cdot \Theta(\cos \kappa(\alpha, \gamma)). \quad (3.77)$$

Кусочная функция  $\kappa(\alpha, \gamma)$ :

$$\kappa(\alpha, \gamma) = \begin{cases} |\alpha| + |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } 0 < \alpha < -|\eta_{кр}| + \frac{\pi}{2} \text{ и } \eta > 0; \\ |\eta(\alpha, \gamma)| - |\alpha|, & \text{если } -|\eta_{кр}| \leq \alpha \leq 0 \text{ и } \eta > 0; \\ |\alpha| - |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } \alpha < -|\eta_{кр}| \text{ и } \eta > 0; \\ |\alpha| + |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } |\eta_{кр}| - \frac{\pi}{2} < \alpha < 0 \text{ и } \eta < 0; \\ |\eta(\alpha, \gamma)| - |\alpha|, & \text{если } 0 \leq \alpha \leq |\eta_{кр}| \text{ и } \eta < 0; \\ |\alpha| - |\eta(\alpha, \gamma)|, & \text{если } \alpha > |\eta_{кр}| \text{ и } \eta < 0; \\ |\alpha|, & \text{если } \eta = 0. \end{cases} \quad (3.78)$$

В выражении (3.77) последний множитель — функция Хевисайда от косинуса угла между нормалью к поверхности лимитера и лучом ОА, вводится для отсечки затенённых областей лимитера.

Подробные схемы (аналогично Рисункам 3.31б и 3.31в) всех вариантов взаимного расположения нормали к поверхности  $n$  и направления полоидальной и радиальной составляющей будут приведены в приложении.

Согласно выражению (3.23) распределение плотности мощности по поверхности лимитера:

$$Q_{\Sigma}(\alpha, \gamma) = Q_{изл}(\alpha, \gamma) + Q_{tor}(\alpha, \gamma) + Q_{pol}(\alpha, \gamma). \quad (3.79)$$

Из выражения (3.24) получаем выражение для полной мощности:

$$P = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} Q_{\Sigma}(\alpha, \gamma) \cdot b(\alpha, \gamma) \cdot a \cdot d\alpha \cdot d\gamma, \quad (3.80)$$

где углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — минимальный и максимальный тороидальные углы плазмы, в диапазоне которых ведётся интегрирование, углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — минимальный и максимальный центральные углы лимитера, в диапазоне которых ведётся интегрирование. Пределы интегрирования получаем из чертежа:

$$\gamma_1 = \frac{0,68\pi}{180}; \gamma_2 = \frac{45\pi}{180}; \alpha_1 = -\frac{\pi}{2}; \alpha_2 = \frac{\pi}{2}. \quad (3.81)$$

Пределы интегрирования по  $\alpha$  получаем из предположения, что с плазмой взаимодействует только половина цилиндрической поверхности лимитера.

Подставив пределы интегрирования, и проинтегрировав, получаем:

$$P = 5,72 \cdot 10^3 \text{ Вт}. \quad (3.82)$$

Согласно выражению (3.25) скачок температуры за время разряда:

$$\Delta T(\alpha, \gamma) = 1,1 \frac{Q_{\Sigma}(\alpha, \gamma) \sqrt{t_{pl}}}{\sqrt{\rho_{CPS} \lambda_{CPS} C_{p \text{ CPS}}}}, \quad (3.83)$$

где в знаменателе стоят интегральные теплофизические характеристики КПС. Учитывая, что КПС является композитным материалом, состоящим из пропитанного литием вольфрамового «войлока», определим интегральные

теплофизические свойства КПС (плотность, теплопроводность и теплоёмкость) по формулам (3.6) – (3.8).

$$\rho_{CPS} = \rho_{Li} \cdot \varepsilon_{Li} + \rho_W \cdot (1 - \varepsilon_{Li}) = 1,36 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (3.84)$$

$$\lambda_{CPS} = \lambda_{Li} \cdot \varepsilon_{Li} + \lambda_W \cdot (1 - \varepsilon_{Li}) = 1,44 \cdot 10^2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad (3.85)$$

$$C_{p.CPS} = C_{p.Li} \cdot \varepsilon_{Li} + C_{p.W} \cdot (1 - \varepsilon_{Li}) = 1,16 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (3.86)$$

Из выражения (3.26) рассчитаем полную площадь приёмной поверхности:

$$S = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} b(\alpha, \gamma) \cdot a \cdot d\alpha \cdot d\gamma = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2. \quad (3.87)$$

Площадь эмиттерной зоны согласно (3.27):

$$S_3 = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} b(\alpha, \gamma) \cdot \Theta(\lambda - \Delta(\alpha, \gamma)) \cdot a \cdot d\alpha \cdot d\gamma = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2. \quad (3.88)$$

Площадь коллекторной зоны по формуле (3.28):

$$S_k = S - S_3 = 1,35 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2. \quad (3.89)$$

Соотношение площадей эмиттерной и коллекторной зон:

$$\mu = \frac{S_3}{S_k} = 0,94. \quad (3.90)$$

Характерная глубина проникновения тепловой энергии по (3.29):

$$X_T = 0,9 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{CPS} \cdot t_{pl}}{\rho_{CPS} C_{p.CPS}}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (3.91)$$

Для проверки выполнения условия функционирования лимитера по температуре вычислим увеличение температуры за разряд в самой теплонапряжённой точке ( $\alpha \approx -\pi/3$ ,  $\gamma \approx 35\pi/180$ ):

$$\Delta T \left( -\frac{\pi}{3}, \frac{35\pi}{180} \right) = 9,5^\circ \text{C}. \quad (3.92)$$

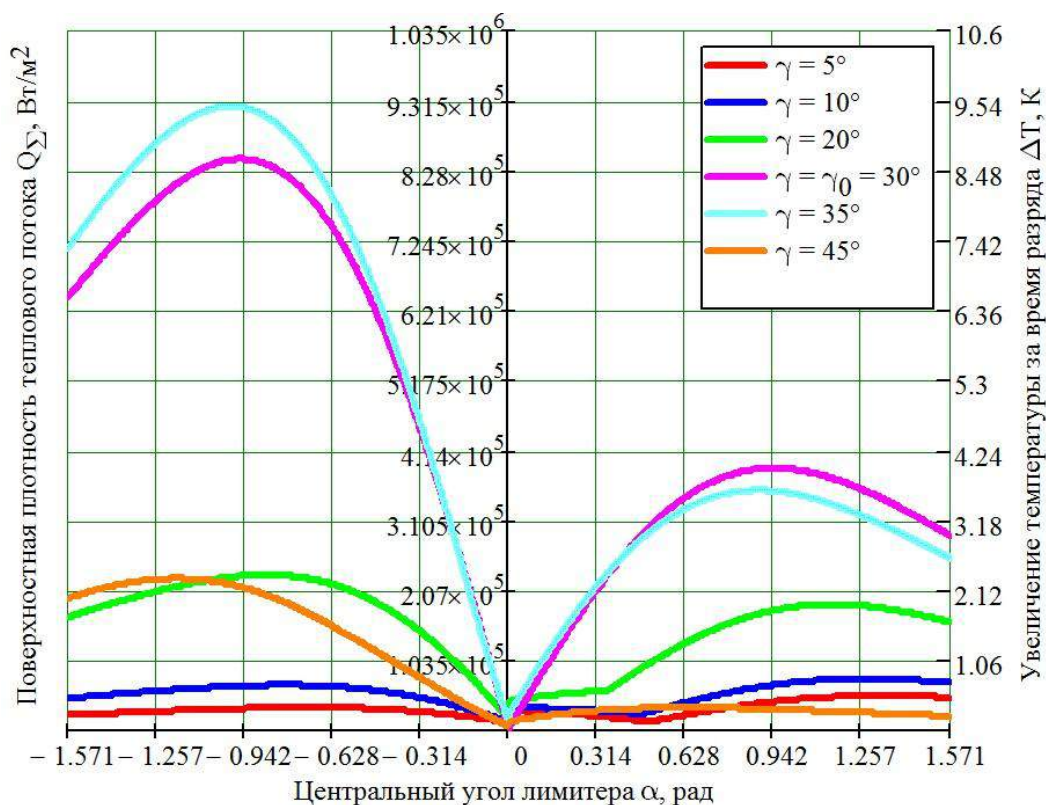
Все полученные результаты из системы MathCAD сведём в Таблицу 9. На Рисунках 3.32, 3.33 показано распределение поверхностной плотности теплового потока на принимающую поверхность и увеличение температуры за разряд в зависимости от тороидального угла плазмы и центрального угла

лимитера, на Рисунке 3.34 — динамика изменения температуры самой теплонапряжённой точки и распространения тепловой энергии вглубь материала.

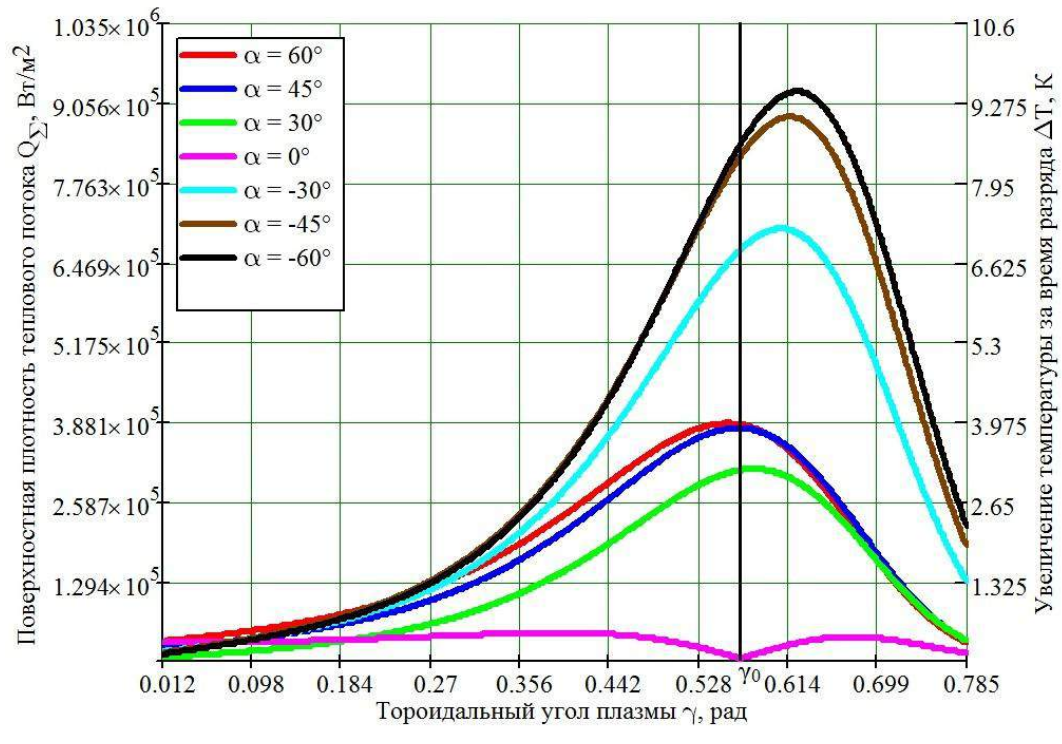
Таблица 9.

Результаты теплового расчёта продольного лимитера

Параметр	Величина
Полная мощность, приходящая на лимитер, Вт	$5,72 \cdot 10^3$
Площадь приёмной поверхности, м <sup>2</sup>	$2,60 \cdot 10^{-2}$
Площадь эмиттерной зоны, м <sup>2</sup>	$1,25 \cdot 10^{-2}$
Площадь коллекторной зоны, м <sup>2</sup>	$1,35 \cdot 10^{-2}$
Отношение площадей эмиттерной и коллекторной зон	0,94
Увеличение температуры в самой теплонапряжённой точке лимитера за разряд, °С	9,5
Характерная глубина проникновения тепловой энергии, м	$1,2 \cdot 10^{-3}$



а



б

Рисунок 3.32. Распределение поверхностной плотности теплового потока на принимающую поверхность лимитера и увеличение температуры поверхности КПС за время разряда: а – при фиксированном значении  $\gamma$ , б –  $\alpha$

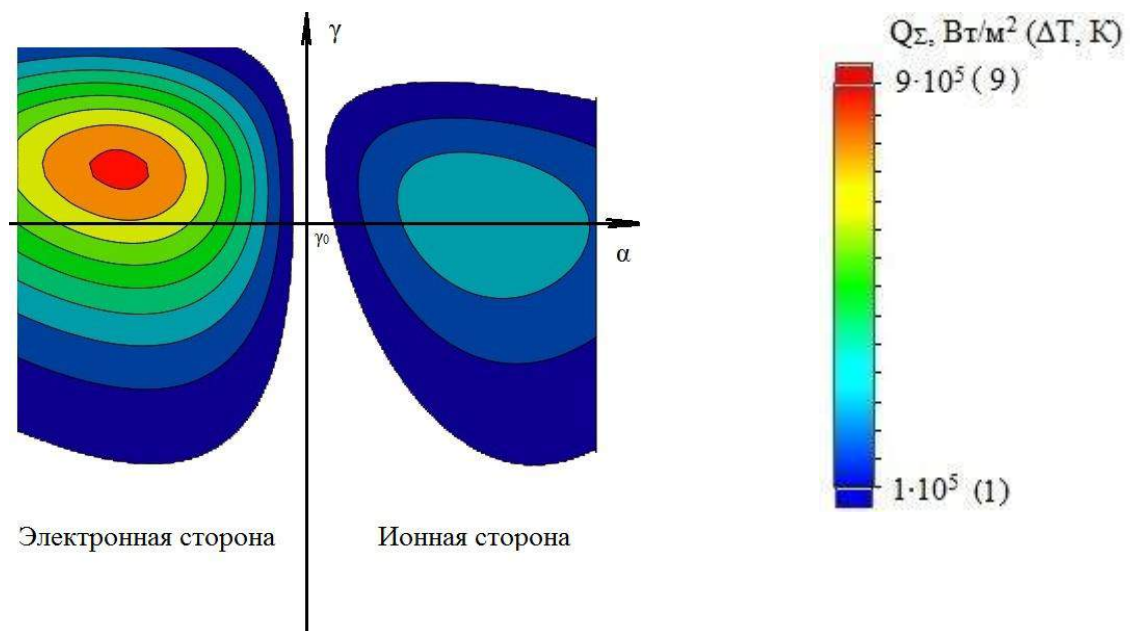


Рисунок 3.33. Диаграмма поверхностной плотности теплового потока на приёмную поверхность и увеличения температуры поверхности за разряд в координатах  $\alpha$ - $\gamma$

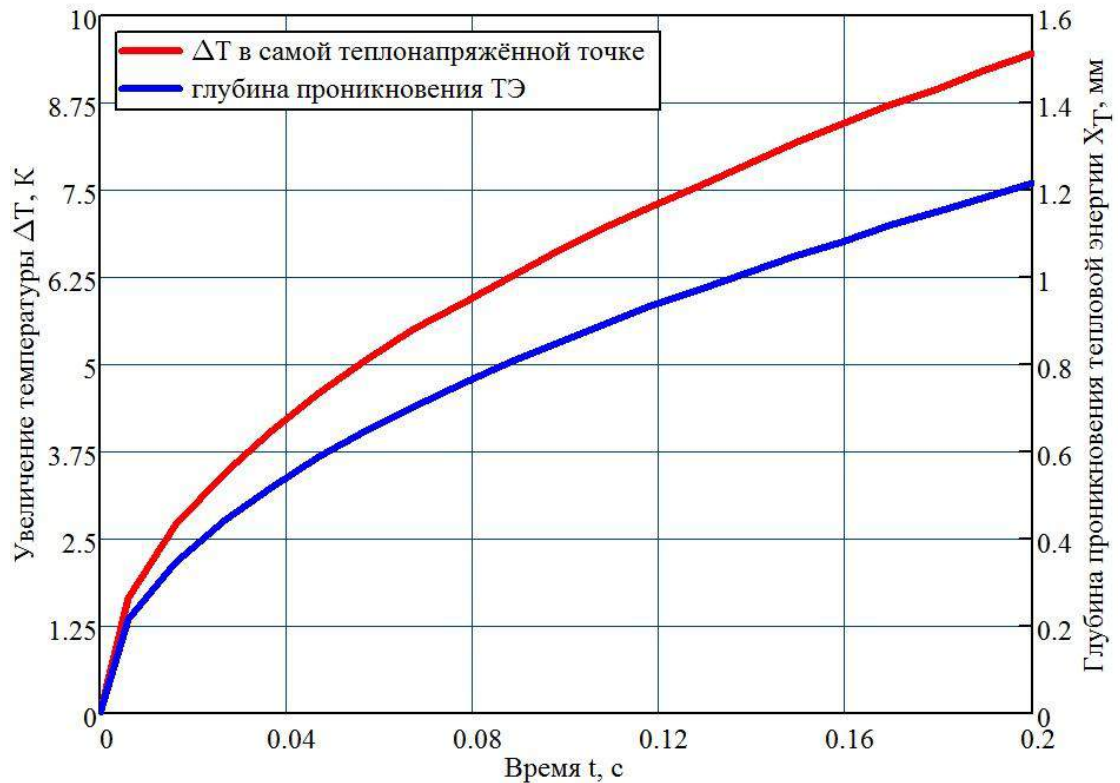


Рисунок 3.34. Увеличение температуры поверхности КПС в течение разряда в самой теплонпряжённой точке лимитера и глубина проникновения тепловой энергии

Выводы: из графиков видно, что наиболее теплонпряжённая точка имеет координаты  $\alpha \approx -\pi/3$ ,  $\gamma \approx 35\pi/180$ . Увеличение температуры данной точки КПС за разряд составляет  $9,5^\circ\text{C}$ , что является малым значением для заданного диапазона температур (от  $200^\circ\text{C}$  до  $550^\circ\text{C}$ ). Как видно из Рисунка 3.32б увеличение температуры в центральной зоне лимитера (зона эмиттера) намного больше увеличения температуры на концах (зона коллектора). Этот факт указывает на принципиальную возможность организации циркуляции лития. Полученная величина толщины проникновения тепловой энергии (1,2 мм) примерно равна толщине КПС (1 мм), что позволяет использовать допущение полубесконечной среды при расчёте температурного поля. Интересно отметить, что в отличие от вертикального и кольцевого лимитеров, тепловая нагрузка на

продольный лимитер ассиметрична относительно точки касания с плазмой ( $\alpha=0$ ,  $\gamma = \gamma_0$ ) — горячее пятно сдвинуто в область больших  $\gamma$ . Судя по малому скачку температуры за разряд по сравнению с предыдущими лимитерами, можно утверждать, что пористый вольфрам, как и ожидалось, является наиболее оптимальным материалом для основы КПС. С точки зрения теплового состояния данная конструкция работоспособна. Вид изготовленного лимитера, установленного в камеру, можно увидеть на Рисунках 3.35а и 3.35б.



Рисунок 3.35. Продольный лимитер Т-11М в камере (а) и перед установкой (б)

### 3.8. Оценка работоспособности лимитеров при нештатных режимах токамака

Приведённые тепловые расчёты лимитеров верны для штатной работы токамака, которая предполагается при проведении экспериментов. Однако, как известно, в плазме токамака возникают различного вида неустойчивости, приводящие к срыву плазменного шнура. Одним из самых опасных для лимитеров последствий появлений неустойчивостей является переход плазмы в режим с релятивистскими электронами (режим с «убегающими» электронами). Данные режимы характеризуются высокими удельными мощностями, приходящими на приёмную поверхность (до  $Q_e=100 \text{ МВт/м}^2$  в течение  $t_e \sim 80 \text{ мкс}$  [66]). Очевидно, что необходимо провести оценку работоспособности



созданных устройств при работе в нештатных режимах. Оценка будет проводиться в соответствии с условием непревышения максимальной температуры литиевой поверхности в 550°C. Максимальная температура приёмной поверхности согласно выражению (3.25):

$$T_{max} = T_{нач} + 1,1 \frac{Q_e \sqrt{t_e}}{\sqrt{\rho_{CPS} \lambda_{CPS} C_{p\ CPS}}}, \quad (3.92)$$

где  $T_{нач}$  – максимальная температура литиевой поверхности, полученная из расчёта начального теплового состояния лимитера. Тогда для кольцевого лимитера ( $T_{нач} = 20^\circ\text{C}$ )  $T_{max} = 73^\circ\text{C}$ , для вертикального лимитера ( $T_{нач} = 357^\circ\text{C}$ )  $T_{max} = 410^\circ\text{C}$ , для продольного лимитера ( $T_{нач} = 297^\circ\text{C}$ )  $T_{max} = 317^\circ\text{C}$ . Видно, что условие работы по температурному диапазону выполняется.

### **3.9. Технологические аспекты реализации концепции замкнутой литиевой петли на стационарных токамаках. Создание собирающей криогенной мишени**

При реализации идеи стационарного токамака с помощью концепции замкнутой литиевой петли неизбежно встаёт проблема неконтролируемого накопления лития на стенках вакуумной камеры. Как следствие, в плёнках лития будет аккумулироваться тритий, что приведёт к экономической нецелесообразности токамака (общеизвестно, что тритий является очень редким и дорогим веществом) и даже к аварийным ситуациям в случае нештатных ситуаций. Решением данной проблемы является периодическая чистка вакуумной камеры от лития. На данный момент чистка производится в технологические перерывы между экспериментальными кампаниями. Процедура очистки заключается в обработке стенок камеры водой, которая, взаимодействуя с литием, превращается в раствор щёлочи LiOH. Данная процедура осуществляется вручную с разгерметизацией вакуумной камеры и надолго вводит установку из строя. По понятным причинам для стационарного

термоядерного реактора такой подход недопустим. В целях организации технологической процедуры очистки вакуумной камеры без её разгерметизации был предложен метод «вымораживания» осевшего лития, распылённого бомбардировкой заряженными частицами в процессе горения тлеющего разряда [67]. Этот метод основывается на том, что литий имеет тенденцию собираться в холодных местах камеры токамака (Рисунок 3.36).

В данном методе мишень, охлаждаемая до криогенных температур, будет работать как крионасос по отношению к атомам лития, который, в свою очередь будет являться геттером для изотопов водорода. После выключения тлеющего разряда криомишень можно извлечь из камеры токамака через вакуумную шлюзовую камеру. Впоследствии захваченный литий и изотопы водорода (в первую очередь тритий) целесообразно извлекать и возвращать в рабочий цикл. Размещение криомишени в камере токамака Т-11М показано на Рисунке 3.37. Основные параметры устройства сведены в Таблицу 10.

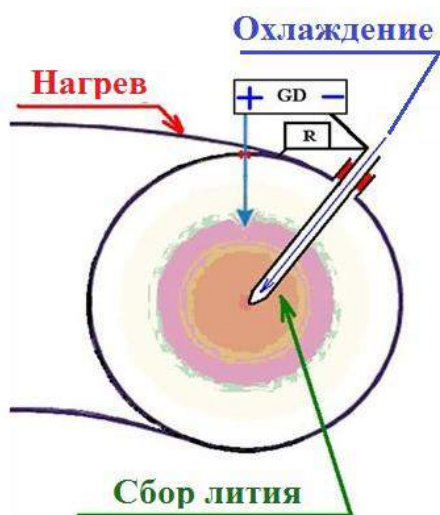


Рисунок 3.36. Схема метода «вымораживания» лития [67]

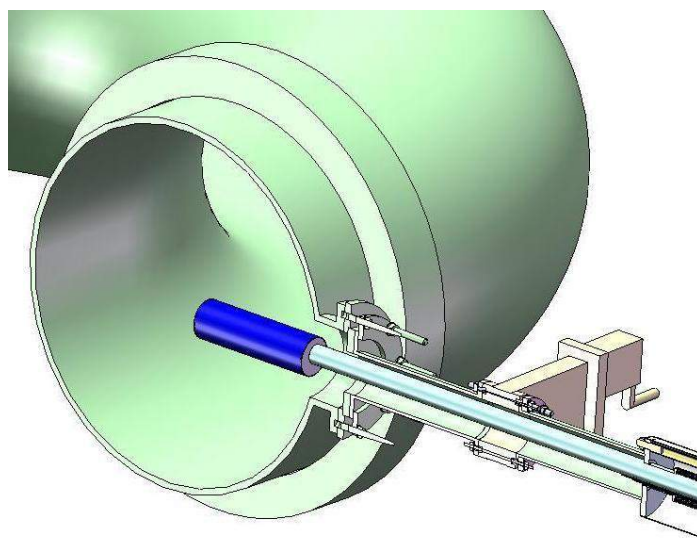


Рисунок 3.37. Расположение криомишени в камере токамака Т-11М

Таблица 10.

## Основные характеристики криомишени

Параметр	Величина
Габаритный размер, Д×Ш×В, мм	900×100×100
Диаметр собирающего элемента, мм	58
Длина собирающего элемента, мм	200
Рабочая температура собирающей поверхности, К	78 – 80,3
Эффективная площадь собирающей поверхности, см <sup>2</sup>	~ 4320
Объем жидкого азота, л	0,3
Расход жидкого азота в рабочем режиме, л/с	$6 \cdot 10^{-5}$
Скорость пара на выходе в рабочем режиме, см/с	1
Расход жидкого азота на захолаживание, л	~1

Общий вид криогенной мишени показан на Рисунке 3.38. Удаление приёмного элемента из вакуумной камеры без её разгерметизации становится возможным благодаря наличию сварного тарельчатого сильфона с ходом 600 мм и шлюзового устройства для периодической установки, и извлечения мишени. Приёмный элемент криомишени подробно рассмотрен на Рисунке 3.39. Он представляет собой трубчатую конструкцию диаметром 58 мм и длиной 200 мм. Температура приемной поверхности мишени, равная температуре кипения жидкого азота, обеспечивается путем подачи жидкого азота во внутреннюю полость трубчатой конструкции мишени. Подача осуществляется через заливную трубку. Испарившийся газообразный азот отводится из внутренней полости в атмосферу. Основным материалом криомишени — сталь 12X18H10T. Контроль температуры приемной поверхности криомишени производится термопарой, введенной во внутреннюю полость. [68]

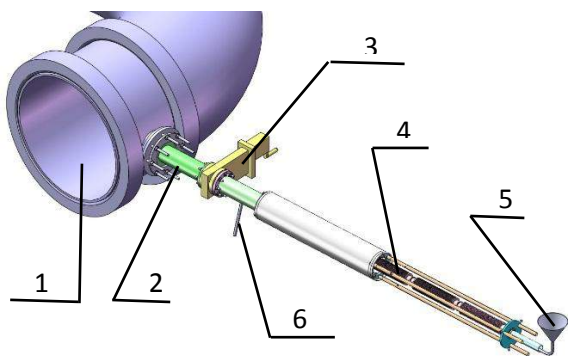


Рисунок 3.38. Общий вид криомишени: 1 – вакуумная камера токамака Т-11М, 2 – шлюзовая камера, 3 – шиббер, 4 – тарельчатый сильфон, 5 – воронка для заливки жидкого азота, 6 – откачной патрубков шлюза

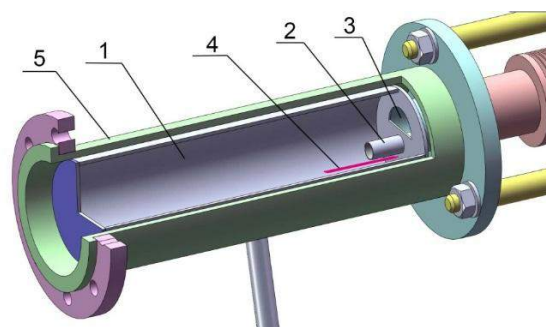


Рисунок 3.39. Приёмный элемент криомишени: 1 – приёмный элемент криомишени, 2 – трубка заливки жидкого азота, 3 – отверстие для выхода испарённого азота, 4 – термопара, 5 – шлюзовая камера

### 3.9.1. Тепловой расчёт криомишени

Основная суть работы криомишени состоит в «вымораживании» лития, поэтому эффективность устройства напрямую зависит от температуры собирающей поверхности. В идеальном случае на поверхности криомишени должна поддерживаться температура, равная температуре кипения жидкого азота  $77,3^{\circ}\text{K}$ , что осуществляется его заливкой во внутреннюю полость. Однако в процессе тлеющего разряда на мишень приходит тепловой поток величиной до 10 Вт. Также приёмная поверхность может нагреваться путём теплопередачи от элементов токамака, которые имеют комнатную температуру. Основная цель расчёта: рассчитать распределение температуры собирающей поверхности криомишени. Расчётная схема представлена на Рисунок 3.40. При расчёте предполагается, что азот залит до верхнего края заливной трубки, торец несущей трубы имеет температуру  $293^{\circ}\text{K}$ .

Решение дифференциального уравнения теплопередачи (3.9) для криомишени выполнено автором численными методами в системе CosmosFlowWorks. Результат представлен на Рисунке 3.41.

Нижняя часть мишени, в которой находится жидкий азот полностью охлаждена до температуры его кипения. Верхняя часть мишени нагревается вплоть до  $92,5^{\circ}\text{K}$ , что было ожидаемо, так как стенки криомишени толщиной 2 мм обладают достаточно высоким термосопротивлением. Но, несмотря на «горячее пятно», локальное повышение температуры мишени на  $15^{\circ}$  не критично для работы, поэтому можно считать, что устройство работоспособно. Вид изготовленной криомишени показан на Рисунке 3.42.

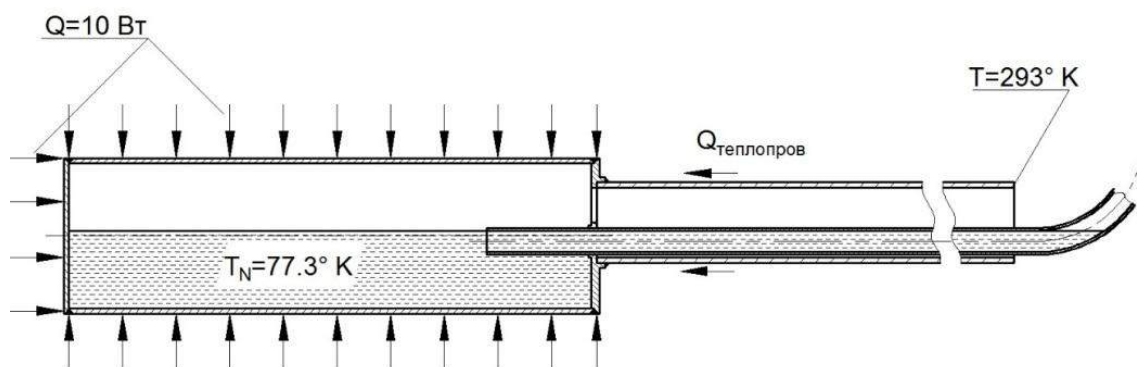


Рисунок 3.40. Расчётная схема

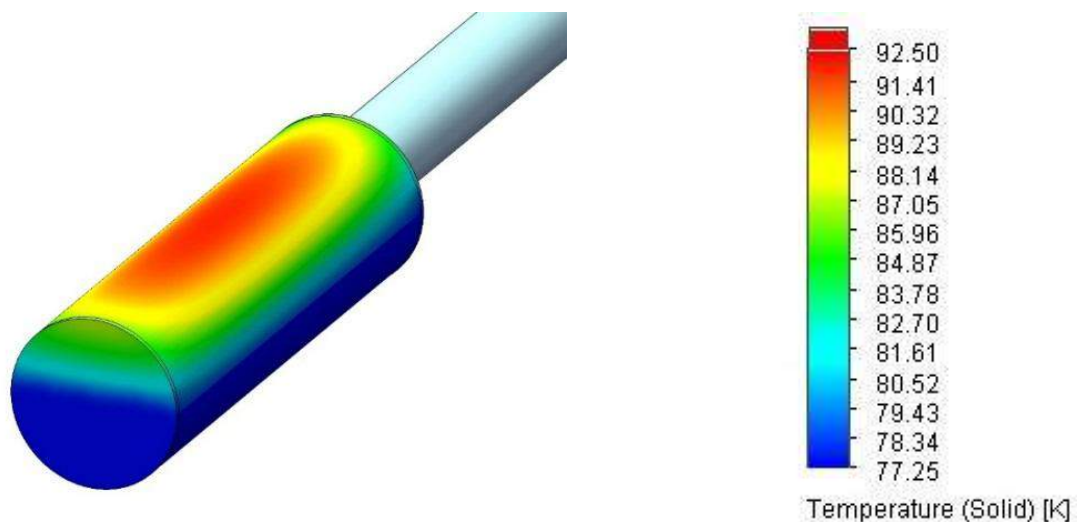


Рисунок 3.41. Результаты теплового расчёта криомишени

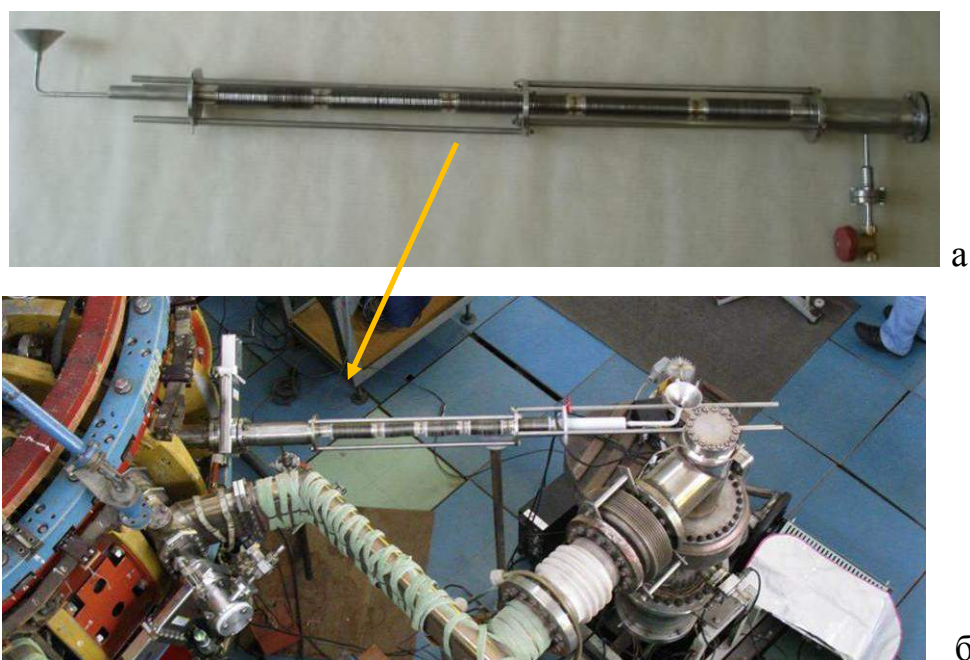


Рисунок 3.42. а – изготовленная криомишень, б – криомишень, установленная на токамак

### 3.10. Выводы по главе 3

Итак, для токамака были сконструированы и рассчитаны три различных лимитера: кольцевой, вертикальный и продольный. Они различаются конфигурацией, формой принимающей поверхности, материалом-основой КПС, расположением в камере и т.д. Очень важно для будущего проектирования провести анализ в целях оптимизации конструкции. Как уже говорилось, основной фактор воздействия на лимитеры — тепловой, поэтому в первую очередь проанализируем тепловые потоки, приходящие на приёмную поверхность. В тепловых расчётах (во время плазменного разряда) был рассчитан самый неблагоприятный вариант тепловой нагрузки, при котором 80% мощности выделялось в SOL токамака. Определяющей величиной при тепловом расчёте является плотность теплового потока на поверхность. Судя по формулам (3.15) и (3.16) тепловой поток от частиц в SOL априори будет выше теплового потока от излучения, ввиду того, что поверхность (см.

знаменатель формул), учитываемая при расчёте излучательной составляющей является тор с параметрами  $R_{tor}/R_{pl}$ , а при расчёте составляющей от частиц в SOL — кольцо толщиной  $\lambda$ . Отсюда следует основное достоинство литиевых КПС как переизлучателя — их применение позволяет повысить долю мощности от излучения и равномерно рассеять тепловой поток от частиц, который сконцентрирован в кольце толщиной  $\lambda$ , по поверхности камеры. Если рассматривать составляющую мощности от частиц в SOL (без учёта фактора геометрии принимающей поверхности), то можно примерно оценить соотношение между тороидальной и полоидальной составляющими:

$$Q_{pol} \sim Q_{tor} \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (3.93)$$

где  $\operatorname{tg} \theta$  мал в силу малости угла  $\theta$  (примерно  $5^\circ$ ) и составляет  $\approx 0.1$ , а это означает, что полоидальная составляющая как минимум меньше тороидальной на порядок.

Также немаловажным является фактор геометрии поверхности. Путём правильного её профилирования можно добиться существенного снижения плотности тепловых потоков. Это отражено в формуле (3.14) в виде скалярного произведения вектора мощности на вектор нормали к поверхности. В работе были спроектированы лимитеры с конической (кольцевой) и цилиндрической (вертикальный и продольный) поверхностью. Фактор поверхности для спроектированных лимитеров выразился в угле  $\alpha$  (фиксированный для кольцевого и варьирующийся для вертикального и продольного лимитеров). При расчёте тороидальной составляющей (самой большой из всех) этот угол являлся углом между потоком и нормалью к поверхности. В случае кольцевого лимитера, где  $\alpha = \text{const}$ , тепловой поток спадает экспоненциально по радиусу. По-другому тепловой поток спадет в лимитерах с цилиндрической приёмной поверхностью: в этом случае одновременно увеличивается косинус угла  $\alpha$  и уменьшается экспоненциальный множитель (в силу увеличения расстояния до последней замкнутой магнитной поверхности). Таким образом, на вершукке лимитера (самая близкая точка лимитера к последней замкнутой магнитной



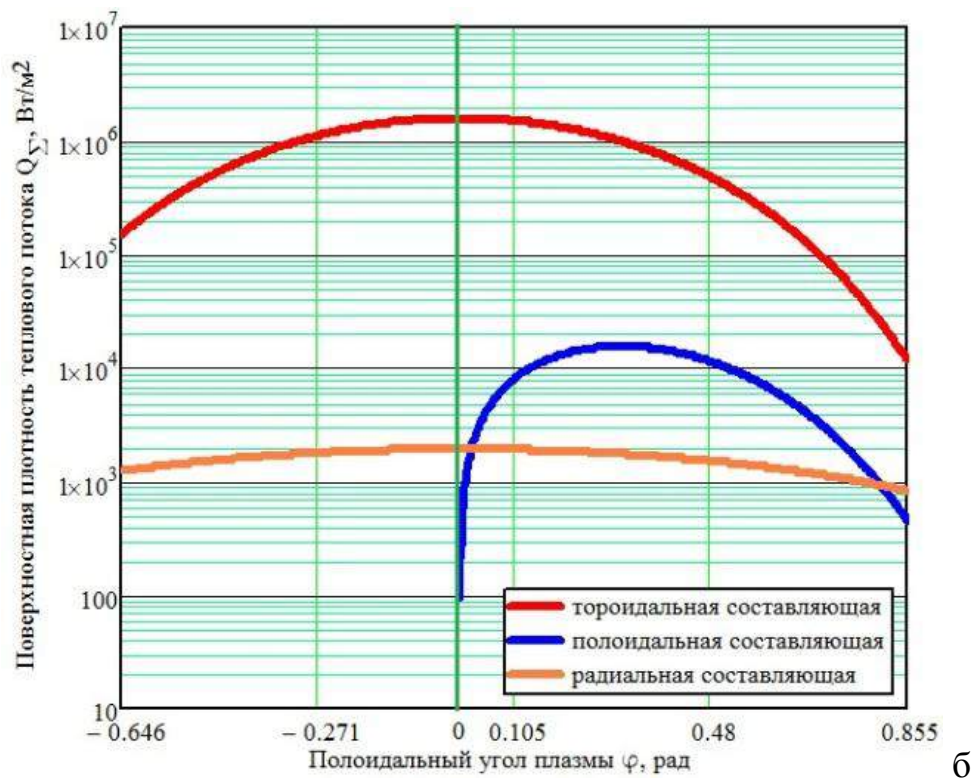
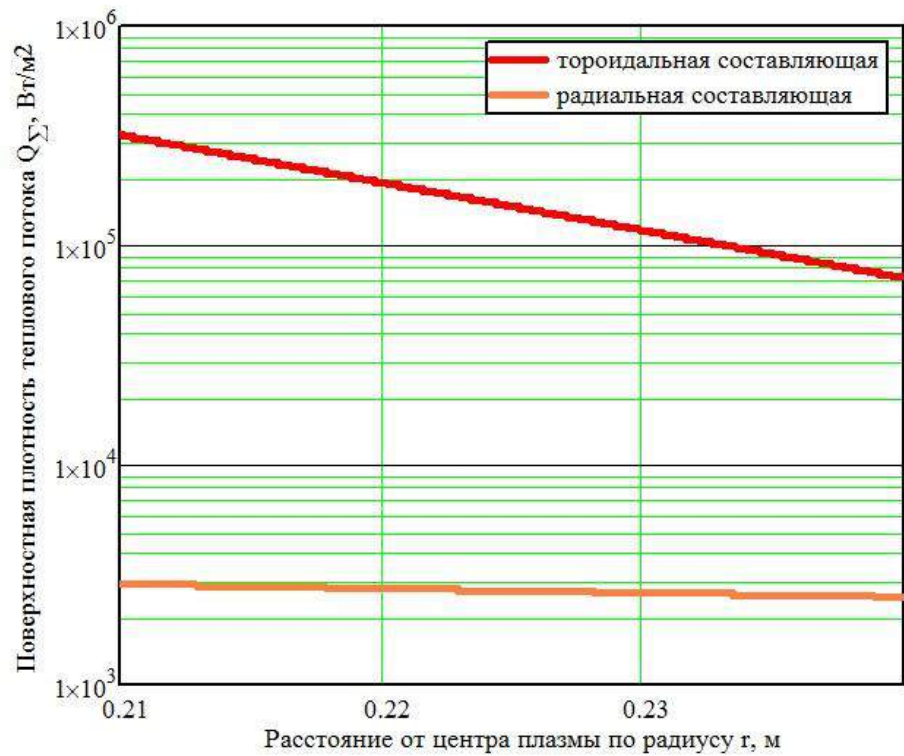
поверхности для данного поперечного сечения), где  $\alpha = 0$ , поток тоже равен нулю. С увеличением угла  $\alpha$  до какого-то определённого значения поток увеличивается, а затем снова падает в силу резкого уменьшения экспоненциального множителя. Применение цилиндрической поверхности позволяет значительно уменьшить тепловые потоки в зонах лимитера наиболее близких к последней замкнутой магнитной поверхности в силу малости угла  $\alpha$ . Если развивать данную мысль, то можно прийти к выводу, что самая оптимальная форма принимающей поверхности должна иметь форму «сплюсненной шляпки гриба», на верхушке которой угол между тепловым потоком и нормалью равен  $90^\circ$  и постепенно уменьшается по мере удаления от точки контакта с плазмой.

Немаловажным также является анализ расположения лимитера в камере. Как было отмечено выше, лимитеры можно разделить на тороидальные, полоидальные и рельсовые (Рисунок 3.7). Из спроектированных лимитеров к полоидальным относится кольцевой лимитер, к рельсовым – вертикальный, продольный лимитер же являет собой некоторую суперпозицию рельсового и тороидального лимитера. Влияние вида устройства на величину тепловых потоков отчётливо можно проследить на примере кольцевого лимитера. В выражении (3.35) для полоидальной составляющей видно, что вследствие выбранной конфигурации эта составляющая равна нулю. Это объясняется тем, что в любой его точке вектор нормали к приёмной поверхности перпендикулярен полоидальному потоку. Отсюда вытекает важное следствие, что наименее теплонапряжёнными будут тороидальные лимитеры, в которых нормаль к поверхности всегда перпендикулярна тороидальной составляющей.

Для сравнения тороидальной, полоидальной и радиальной компонент теплового потока (с учётом фактора геометрии и расположения) созданных лимитеров на Рисунке 3.43 приведены графики (ось ординат выполнена в логарифмическом масштабе). Видно, что тороидальная составляющая превалирует над остальными. Сравнивая тороидальную и радиальную (от



излучения) составляющие можно увидеть, что в случае переизлучения литием до 80% теплового потока можно как минимум на порядок уменьшить пиковые тепловые нагрузки на приёмную поверхность.



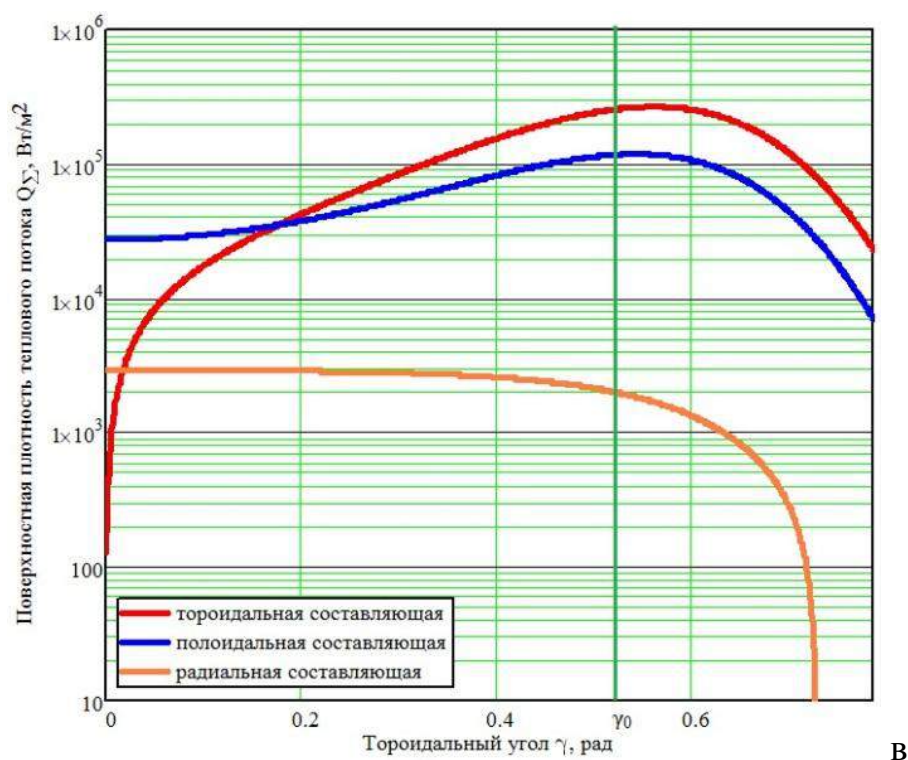


Рисунок 3.43. Сравнение составляющих теплового потока для кольцевого (а), вертикального (б), продольного (в) лимитеров. Для кольцевого рассмотрена электронная сторона, для вертикального –  $\alpha = \pi/3$  и продольного –  $\alpha = -\pi/3$

Увеличению эксплуатационных характеристик лимитеров способствует и правильный выбор материала-основы КПС. Как видно из формулы (3.25) скачок температуры на поверхности лимитера тем ниже, чем выше теплофизические характеристики материала: плотность, теплопроводность и теплоёмкость. Сравнивая два материала: нержавеющая сталь и вольфрамовый «войлок», предпочтение следует отдавать второму в силу высоких значений его характеристик. Применение таких термостойких материалов позволяет значительно расширить диапазон воспринимаемой нагрузки на лимитер.

При конструировании лимитеров необходимо выбирать наиболее оптимальное размещение запаса лития относительно нагревателя. Основное условие: литий в баке должен располагаться наиболее близко к нагревателю. Это позволит уменьшить начальную температуру КПС в идеальном случае до температуры плавления лития. При сравнении вертикального и продольного

лимитеров видно, что продольный лимитер спроектирован более рационально, так как бак с литием расположен на всём протяжении нагревателя. В отличие от продольного лимитера бак с литием вертикального лимитера имеет очень малую протяжённость. Вследствие этого температура КПС вертикального лимитера разогревается до температуры  $357^{\circ}\text{C}$  при разогреве лития в баке до  $250^{\circ}\text{C}$ . В это же время КПС продольного лимитера греется всего лишь до  $297^{\circ}\text{C}$  при аналогичном разогреве лития в баке. К тому же можно видеть, что для нагревателя продольного лимитера требуется мощность 50 Вт, а для нагревателя вертикального лимитера — 80 Вт.

Рекомендации к проектированию будущих лимитеров:

- 1) использование эффекта переизлучения позволяет существенно снизить тепловые нагрузки на лимитер — основное преимущество использования лития как материала контактирующего с плазмой;
- 2) оптимальной формой принимающей поверхности лимитера является «сплюснутая шляпка гриба», где в точке контакта с плазмой угол между тепловым потоком и нормалью равен  $90^{\circ}$  и постепенно уменьшается по мере удаления от неё;
- 3) анализ показал, что наименее теплонапряжёнными являются тороидальные лимитеры;
- 4) наиболее оптимальными для основы КПС являются материалы с высокими теплофизическими характеристиками (плотность, теплопроводность, теплоёмкость);
- 5) бак с литием необходимо располагать на протяжении всей длины нагревателя и как можно ближе к нему.

#### **Глава 4. Исследование литиевых капиллярно-пористых систем как материала, непосредственно контактирующего с горячей плазмой токамака**

Основная часть всех устройств, описанных в главе 3, — литиевые капиллярно-пористые системы, которые обеспечивают их безопасное взаимодействие с горячей плазмой. Это становится возможным благодаря преимуществам лития как внутрикамерного материала перед другими материалами (бериллий, графит, вольфрам) в совокупности с капиллярно-пористой системой, которая обеспечивает стабилизацию в условиях МГД-нагрузок и регенерацию жидкой поверхности. Суть защиты внутрикамерных поверхностей с помощью литиевых КПС изложена в главе 1. В соответствие с ней, литиевые КПС позволяют организовать замкнутый контур циркуляции лития, рассеивающий до 80% тепловой энергии [36]. Одно из основных преимуществ такой схемы является локализация лития в узкой зоне периферийной плазмы и его непроникновение в центр плазменного шнура [38]. К моменту начала работы над диссертацией исследования распределения потоков эмитированного лития в SOL токамака только начинались. Однако для стационарного термоядерного реактора (для которого и разрабатывалась концепция замкнутой литиевой петли) важно знать, как распространяется литий в SOL по двум причинам: 1) для организации эффективного сбора эмитированного лития и 2) для предотвращения потоков лития на стенки токамака. В данной главе будут рассмотрены проведённые эксперименты на токамаке T-11M, целью которых стали:

- 1) исследования захвата примесей литиевыми КПС в условиях токамака;
- 2) измерение потоков лития в SOL от различных лимитеров (вертикального, горизонтального, продольного, кольцевого и их комбинаций);
- 3) тестирование «бадминтонной» модели;
- 4) эксперименты с отравлением литиевой поверхности бомбардировкой дейтерием;

5) эксперименты по сбору лития, осевшего на стенках вакуумной камеры криогенной мишенью.

#### **4.1. Исследование поведения эмиссии лития из литиевого лимитера под воздействием длительной бомбардировки дейтерием**

Цель исследования — определение изменения эмиссии лития из горизонтального литиевого лимитера в процессе работы стационарного термоядерного реактора. Условия стационарной работы были обеспечены преобразованием токамака Т-11М в стенд с долгоживущей плазмой тлеющего разряда на основе дейтерия [42].

##### **4.1.1. Методика проведения эксперимента**

Цикл тестовой работы заключал в себе: два начальных тестовых разряда токамака после одной ночи с низким вакуумом ( $10^{-2}$  Па), процедура литиизации в гелиевом тлеющем разряде, четыре тестовых разряда токамака, 5 часов в условиях тлеющего разряда на дейтерии, 10 тестовых разрядов токамака, перерыв на 2 дня с низким вакуумом и снова два тестовых разряда токамака. В процессе тестовых разрядов методом регистрации интенсивности рекомбинационного излучения лития на графитовом лимитере (описан в главе 2) снимались данные об эмиссии лития из лимитера.

##### **4.1.2. Результаты тестовой кампании**

Результаты проведённой тестовой кампании представлены на Рисунке 4.1. Исследование показало, что эмиссия свежего литиевого покрытия после пятичасовой экспозиции в дейтерии уменьшалась не больше, чем на 20 %. Такое экспонирование эквивалентно  $\approx 1000$  секундам экспозиции первой

стенки Т-11М в обычных разрядах и  $\approx 10$  секундам экспозиции лимитера. Это означает, что эффект «отравления лития бомбардировкой дейтерия» является не столь значительным, и литиевый лимитер может использоваться в течение стационарной работы токамака как эмиттер лития. Однако в этих экспериментах было обнаружено, что эмиссия лития является очень чувствительной к «отравлению лития остаточными газами» в течение пауз в откачке. Для устранения влияния остаточных газов на работу литиевых внутрикамерных элементов в будущем стационарном токамаке-реакторе будет достаточно поместить всю камеру стационарного токамака в дополнительную герметичную оболочку, заполненную инертным газом.

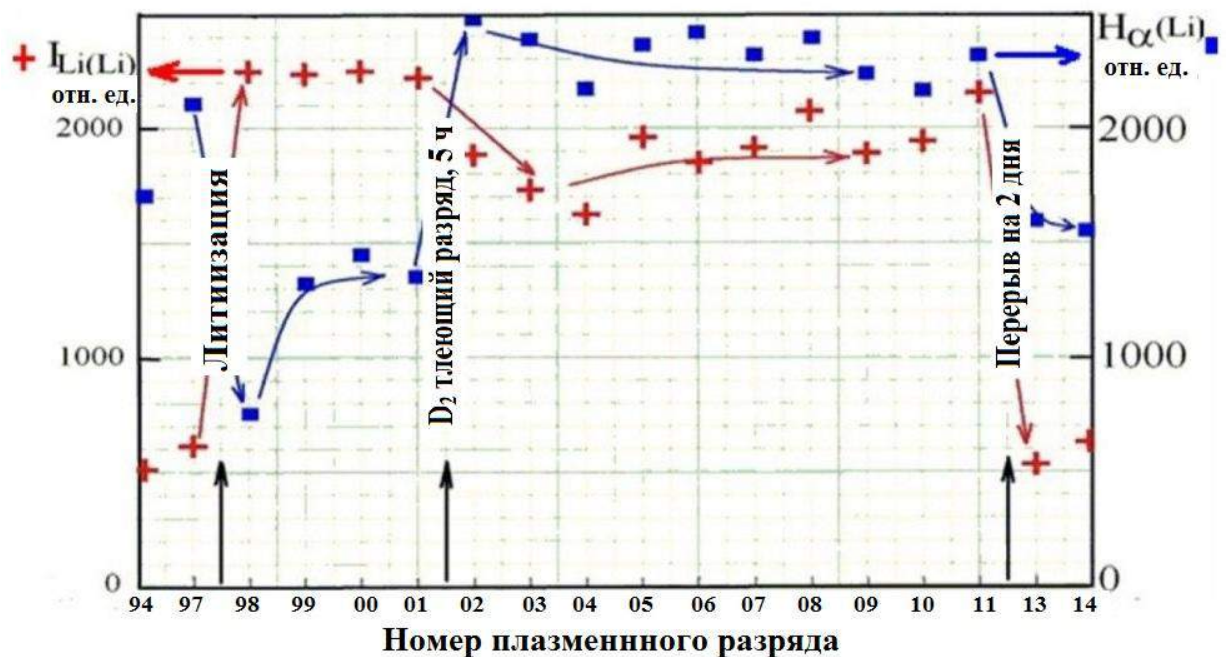


Рисунок 4.1. Изменение эмиссии лития из литиевого лимитера в течение экспериментальной кампании. + — эмиссия лития, ■ — эмиссия водорода

## 4.2. Исследование захвата примесей литиевыми КПС в условиях токамака

### 4.2.1. Постановка эксперимента

Для получения предварительной информации о миграции примесей в плазменной камере Т-11М при проведении экспериментов с литиевыми лимитерами в токамаке были экспонированы образцы сетки из нержавеющей стали собирающих элементов кольцевого лимитера. Образцы размером 40×45 мм, предварительно смоченные литием в аргонно-вакуумном перчаточном боксе (Рисунок 4.2), экспонировались в течение ~200 плазменных разрядов в непосредственной близости от литиевого лимитера. После извлечения из плазменной камеры токамака образцы были прогреты на воздухе для перевода находящегося на них лития и, возможно, перенесенных из плазменной камеры других элементов в нейтральную форму (Рисунок 4.3).



Рисунок 4.2. Образец сетки, смоченной литием, в аргонно-вакуумном перчаточном боксе



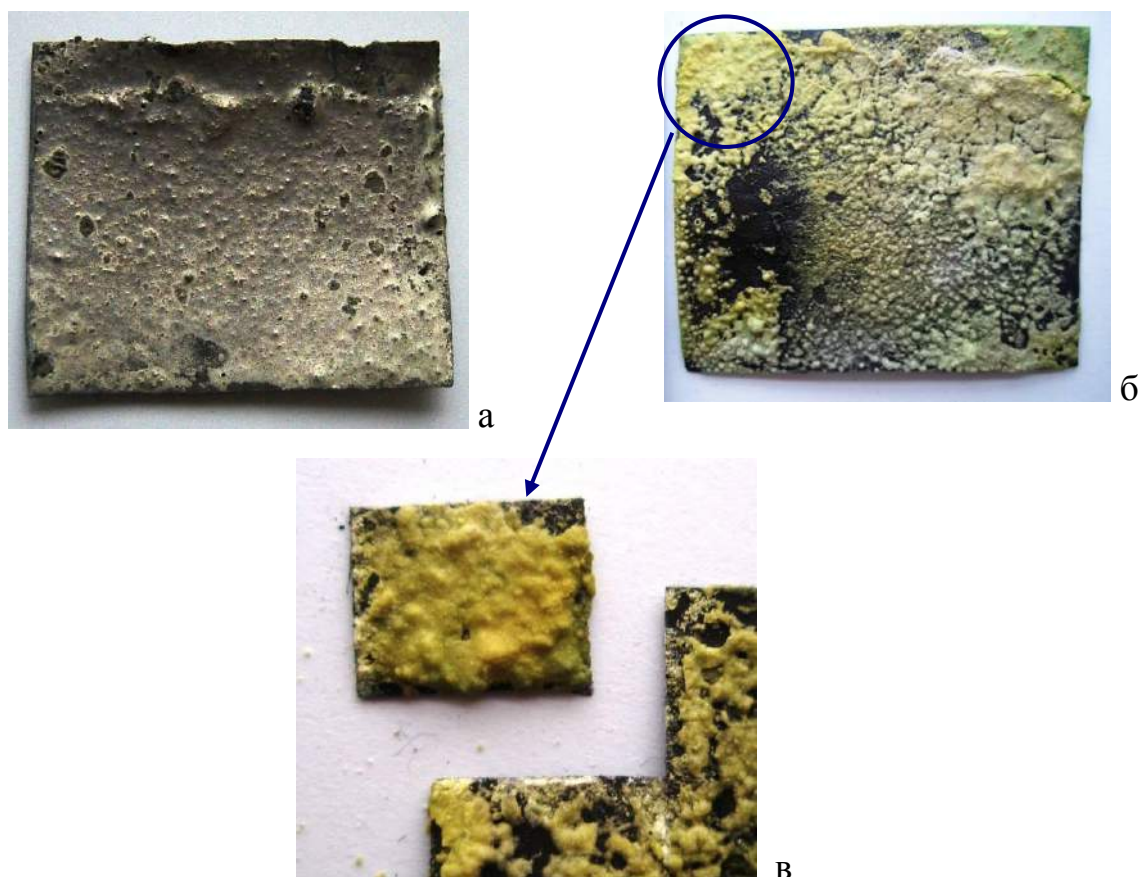


Рисунок 4.3. Образцы сетчатого материала: а – после извлечения из токамака; б – после дополнительного прогрева на воздухе; в – образец сетчатого материала, отобранный для анализа

После прогрева образцов цвет поверхности трансформировался из серого в желто-зеленый. Для карбоната лития  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , который должен был образоваться при прогреве, характерен белый цвет и, следовательно, наличие окраски поверхностной пленки образца свидетельствует о присутствии в ней дополнительных примесных элементов. Для исследования элементного состава взятого образца (Рисунок 4.3в) был использован растровый электронный микроскоп, оснащенный энергодисперсионным рентгеновским анализатором, позволяющим определять содержание химических элементов, начиная от бора и до урана. Чувствительность метода составляла  $\sim 10^{-3}\%$  и точность —  $\pm 0,01\%$  по массе.



#### 4.2.2. Результаты химического анализа поверхности образца

Типичный вид поверхности анализируемого образца показан на Рисунке 4.4. На Рисунке 4.5 показаны изображения пяти произвольно выбранных областей поверхности анализируемого образца и в Таблицах 11 – 13 результаты химического анализа поверхности образца, усредненного по площади (области 1, 2 и 3) и локального в выбранных точках (области 4 и 5).

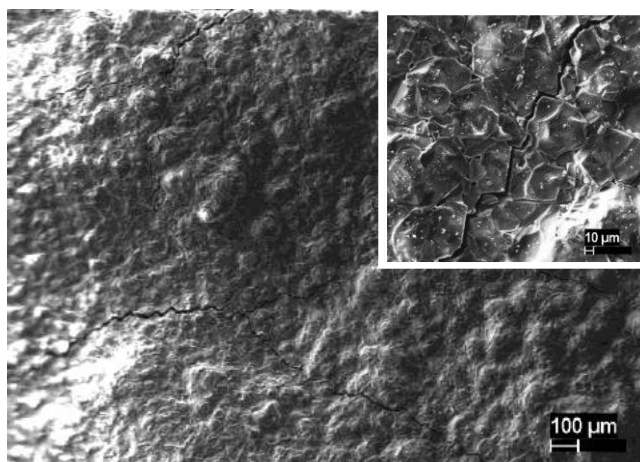
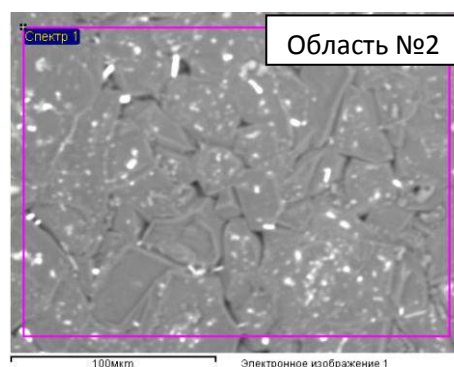
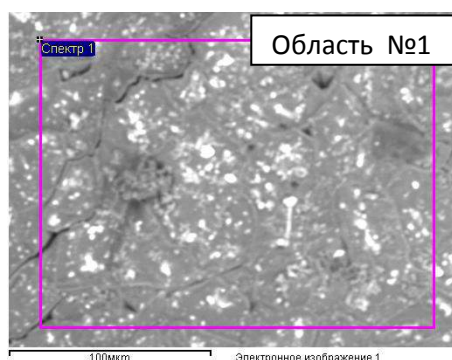


Рисунок 4.4. Растровое электронно-микроскопическое изображение поверхности образца сетчатого материала, пропитанного литием и подвергнутого прогреву на воздухе после экспозиции в камере токамака Т-11М



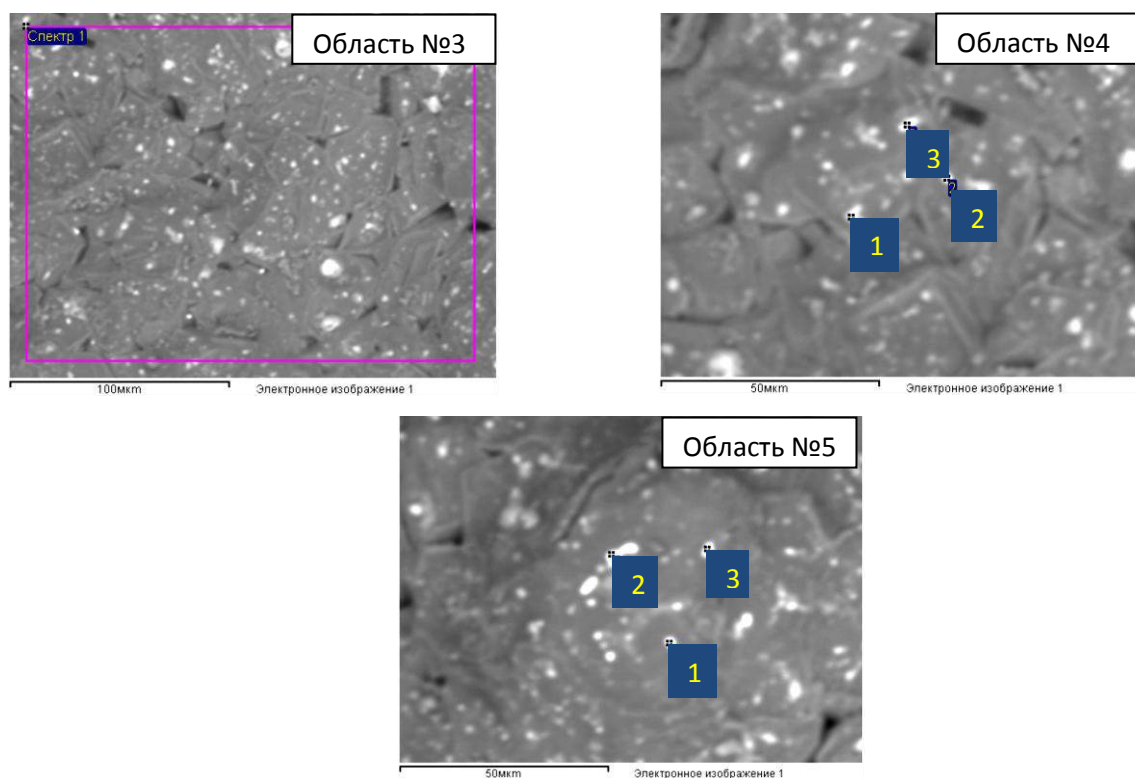


Рисунок 4.5. Электронное изображение разных областей поверхности анализируемого образца (в рамках – анализируемая поверхность)

Таблица 11.

Усредненный по площади химический состав  
областей 1, 2, 3 анализируемого образца

Элемент	Содержание, %		
	Область 1	Область 2	Область 3
C	26,03	22,41	24,27
O	68,99	74,45	72,79
Na	0,20	0,06	0,05
Al	0,05	0,00	0,00
Si	0,16	0,08	0,07
Cl	0,16	0,00	0,05
K	0,18	0,00	0,11
Cr	3,39	1,93	2,37
Ba	0,84	1,07	0,29

Таблица 12.

Химический состав выделений в области 4 анализируемого образца

Элемент	Содержание, %		
	Выделение №1	Выделение №2	Выделение №3
C	20,69	20,73	20,12
O	68,27	63,12	66,85
Na	0,21	0,11	0,17
Si	0,05	0,06	0,06
Cl	0,12	0,00	0,27
K	0,58	0,11	0,49
Cr	9,63	5,38	11,27
Ba	0,46	10,50	0,77

Таблица 13.

Химический состав выделений в области 5 анализируемого образца

Элемент	Содержание, %		
	Выделение №1	Выделение №2	Выделение №3
C	20,39	20,73	21,12
O	60,48	59,90	60,96
Na	0,11	0,09	0,13
Si	0,15	0,05	0,09
Cl	0,05	0,05	0,07
K	0,11	0,07	0,12
Cr	6,18	6,16	6,10
Ba	12,53	12,94	11,41

Во всех случаях основными по количеству в анализируемой пленке являются кислород и углерод в соотношении  $\sim 1/3$ . Это приблизительно

соответствует соотношению этих компонентов в соединении  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , которое и должно составлять основу пленки на поверхности собирающего элемента. Примеси Na, K, Si в зафиксированных количествах соответствуют их содержанию в используемом в экспериментах электролитическом литии марки ЛЭ-1.

На поверхности пленки обнаружено значительное содержание хрома — несколько процентов, локализованного в отдельных частицах. Проведенное исследование показало, что по мере приближения по сколу анализируемой пленки к поверхности сетки из нержавеющей стали содержание хрома увеличивается, и кроме него появляются железо и никель, являющиеся основными компонентами сетки — подложки. Это позволяет сделать вывод, что наличие этих элементов (Cr, Fe, Ni) в пленке является следствием коррозионного взаимодействия гидратированных продуктов взаимодействия лития с воздухом при прогреве образцов и к миграции примесей в камере токамака не имеет отношения. Происхождение примеси бария, содержание которого в выделениях достигает более 10 % на настоящий момент не установлено.

Таким образом, по полученным данным в камере токамака при литиевых экспериментах примесные элементы (кроме примеси лития) не мигрируют и, следовательно, не будут искажать анализируемые процессы транспорта лития при экспериментах с кольцевой собирающей диафрагмой.

#### **4.3. Исследования транспортировки лития в экспериментах с кольцевым лимитером**

Цель данного исследования — определение абсолютных значений полного потока лития, эмитированного в плазму горячей зоной горизонтального рельсового лимитера в процессе разряда, оценка радиального потока лития от лимитера к стенке токамака, выделение из этого потока доли, собираемой холодной (боковой) частью литиевого лимитера и доли,

достигающей стенки. Знание этих потоков по отдельности позволяет оценить циркулирующую часть литиевого потока лимитер-плазма в реальных условиях T-11M [69].

#### **4.3.1. Размещение лимитеров и методика проведения экспериментов**

Схема расположения лимитеров токамака T-11M и диагностических устройств, использовавшихся в экспериментах, показана на Рисунках 2.2, 3.1. В данной серии экспериментов использовались кольцевой, горизонтальный и графитовый лимитеры.

Миграция лития в SOL и его сбор лимитерами были изучены методом регистрации интенсивности рекомбинационного излучения лития, приходящего на поверхность подвижного графитового лимитера, нагретого до 400°C, а также с помощью массового химического анализа образцов-свидетелей, расположенных на собирающих поверхностях лимитеров.

#### **4.3.2. Определение циркуляционной части литиевого потока**

На Рисунке 4.6 показаны все характерные потоки лития, имеющие место в процессе плазменного разряда. На Рисунке 4.6а случай без кольцевого лимитера, на Рисунке 4.6б — с ним. На Рисунке 4.6: 1 — первичный поток лития от горизонтального лимитера в плазму, 2 — циркуляционный (вторичный) поток плазма-лимитер-плазма (отражение лития и самораспыление), 3 — поток лития на боковые поверхности горизонтального лимитера, 4 — поток лития на стенку камеры, 5 — обратный поток лития со стенки в плазму и на кольцевой лимитер, 3R — поток из плазмы на кольцевой лимитер.

Метод интенсивности рекомбинационного излучения может дать только относительное радиальное (по малому радиусу) распределение продольных литиевых потоков. Для получения абсолютных значений потоков необходимо

измерить количество лития, собранного некоторым коллектором, находящемся в SOL, гарантированно пересекающим определённую область магнитных поверхностей. Таким коллектором стал созданный кольцевой лимитер, помещённый в тень горизонтального литиевого лимитера.

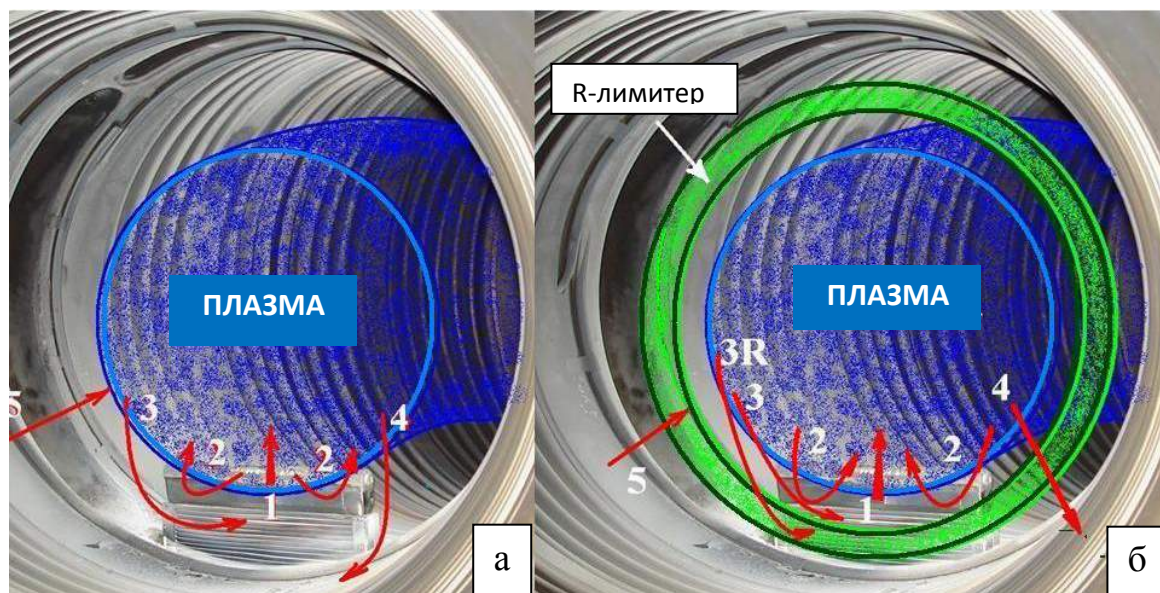


Рисунок 4.6. Схема циркуляционных потоков лития близ горизонтального литиевого лимитера (а) и горизонтального вместе с кольцевым (б)

Абсолютная калибровка осуществлялась сравнением результатов абсолютных измерений массы лития (методом массового химического анализа), накопленного на кольцевом лимитере Т-11М в ходе 1000 разрядных импульсов, с результатами относительных измерений методом рекомбинационной мишени.

На Рисунке 4.7 представлены распределения литиевых потоков для случаев без (I) и с (II) кольцевым лимитером. В случае I имеет место экспоненциальный спад интенсивности рекомбинационного излучения (а, следовательно, и потока лития). В случае же II поток лития спадает по кусочно-экспоненциальному закону с характерным «изломом». При  $r < 22$  см зависимости примерно одинаковые, при  $r > 22$  см кривая II резко уходит вниз. Такое поведение полученных кривых объясняется захватом лития кольцевым лимитером. Анализ показывает, что если принять во внимание причину излома



кривой II, то интегрированием по  $r$  можно вычислить общую сумму лития, собранного кольцевым лимитером (поток  $3R+5$ , Рисунок 4.6б) по отношению к полному количеству лития ( $1+2$ , Рисунок 4.6) циркулирующего в SOL ( $r = 22 - 19$  см). Отношение составляет  $\approx 0,12$ .

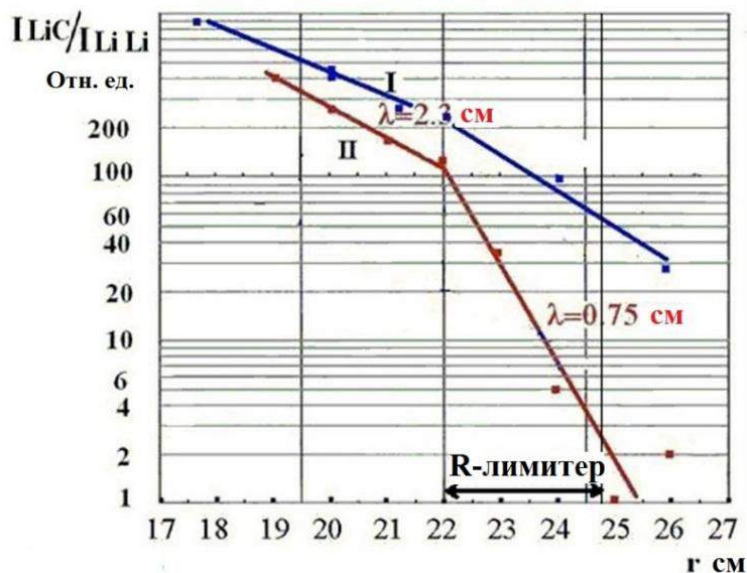


Рисунок 4.7. Радиальные распределения литиевых потоков с кольцевым коллектором (II) и без него (I)

Циркуляционная часть (поток 2), которая охлаждает периферию плазмы некорональным излучением, составляет разность между потоками  $(1+2)$  и  $(3+3R)$ . В течение экспериментальной кампании в 1000 разрядов кольцевым лимитером было собрано  $120 \pm 10$  мг лития, боковыми стенками горизонтального лимитера —  $100 \pm 10$  мг. Таким образом, полное количество лития примерно равно 1 г, количество лития, вовлечённого в циркуляционную петлю — 800 г. Иными словами циркуляционная часть литиевого потока составляет  $\approx 80\%$  от всего количества лития. Литиевый поток на стенку камеры (поток 4) в квазистационарной фазе разряда T-11M с обычной лимитерной геометрией приблизительно составил 10 % от полного количества лития и примерно 1 % с кольцевым лимитером.

### **4.3.3. Определение литиевого потока со стенки камеры в плазменный шнур**

Для оценки роли литиевого потока со стенки камеры в плазменный шнур (Рисунок 4.6б, поток 5) в Т-11М был выполнен дополнительный эксперимент с кольцевым лимитером. Суть эксперимента заключалась в замене литиевого рельсового лимитера на основе КПС на идентичный рельсовый графитовый лимитер. Поскольку горизонтальный литиевый лимитер был удален в вакуумный порт, единственным источником лития была стенка камеры, покрытая  $\approx 20$  г лития (в результате предыдущих экспериментальных кампаний). Кампания из 400 выстрелов показала, что интенсивность литиевой эмиссии со стенки камеры в плазменный шнур (5) была в экспериментах Т-11М не больше 10 % от первичного литиевого потока (1), удалось собрать всего лишь 8,6 мг лития. Это подтверждает предположение, что основной сбор лития происходит именно с лимитера, а не со стенки токамака.

### **4.3.4. Определение азимутального распределения осаждённого лития на кольцевой лимитер**

Применение в экспериментах кольцевого лимитера также позволило получить азимутальное распределение осаждённого лития на кольцевой лимитер. На Рисунке 4.8а показаны распределения лития по азимуту на ионной стороне (слева) и на электронной стороне (справа) кольцевого лимитера. Из Рисунка видно, что на внутреннем обводе тора имеет место увеличение плотности осаждения лития. Это может быть результатом некоторого смещения магнитных поверхностей к оси тора. На Рисунке 4.8б показаны распределения лития, собранного кольцевой диафрагмой в условиях использования в качестве основного лимитера графитового лимитера. [39]



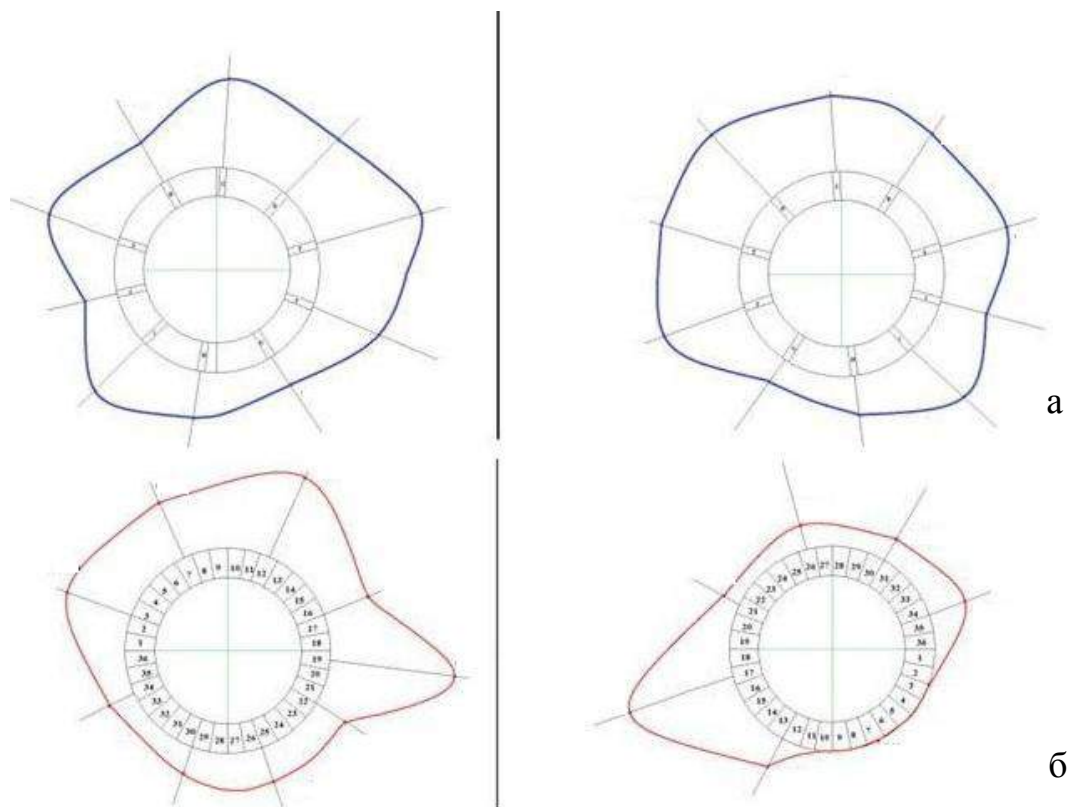


Рисунок 4.8. Распределения лития по азимуту кольцевого лимитера с (а) и без (б) горизонтального литиевого лимитера (вертикальная черта – вертикальная ось токамака, слева – ионная сторона, справа – электронная)

#### 4.3.5. Основные результаты экспериментальной кампании

На Рисунке 4.9 показан кольцевой лимитер после извлечения из вакуумной камеры. Видно, что он в рабочем состоянии. На Рисунке можно заметить белёные отложения — собранный литий. Основные результаты проведённой экспериментальной кампании:

1) определено абсолютное количество собранного лития за экспериментальную кампанию в 1000 разрядов:  $220 \pm 20$  мг, что соответствует расходу лития 1,1 мг/с в условиях данного токамака. Доля лития участвующего в процессе циркуляции  $\approx 80\%$ . Полученные результаты свидетельствуют о чрезвычайной экономичности защиты внутрикамерных элементов с помощью переизлучения по сравнению, например, с методом текущей

жидкометаллической плёнки [14, 15], в котором расход вещества составляет  $\approx 10 \dots 100$  г/с (оценка для токамака Т-11М);

2) в экспериментах с кольцевым лимитером количество лития, достигающего стенок вакуумной камеры, составляет 1% от всего количества теряемого лития, в экспериментах без кольцевого лимитера этот показатель увеличивается до 10%;

3) основной поток лития на кольцевой лимитер приходит с горизонтального лимитера, а не со стенок камеры.

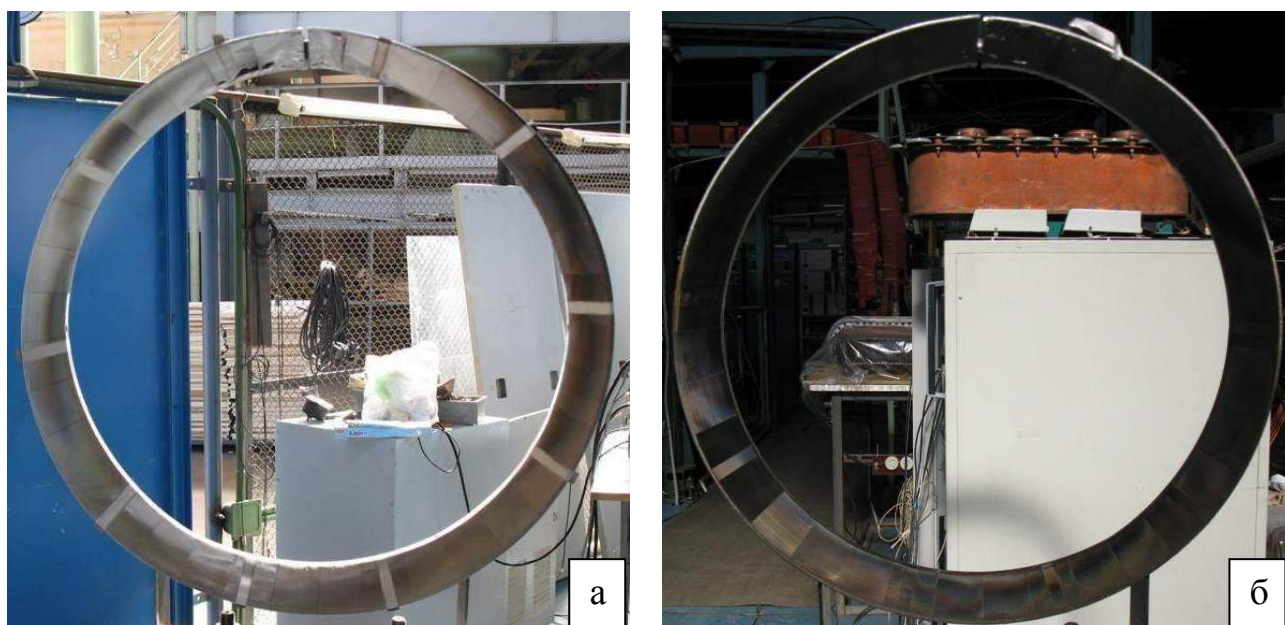


Рисунок 4.9. Вид кольцевого лимитера сразу после извлечения из вакуумной камеры токамака Т-11М: а – электронная сторона, б – ионная сторона

#### **4.4. Исследование транспортировки лития в экспериментах с литиевыми вертикальным, горизонтальным и графитовым лимитерами.**

Цель данного исследования — получение реальной картины динамики литиевого переноса в условиях токамака Т-11М при использовании вертикального и горизонтального литиевых лимитеров, а также создание

замкнутого контура литиевой циркуляции на основе бадминтонной модели [39].

Самым примитивным вариантом организации замкнутой циркуляции лития в токамаке может стать периодическое извлечение кольцевого лимитера-коллектора из вакуумной камеры токамака с извлечением из него захваченного лития и механическим его возвратом в зону эмиссии. Очевидно, что периодическая разгерметизация токамака недопустима в будущих ИТЭР-подобных реакторах. Одной из наименее затратных схем организации замкнутой литиевой циркуляции, как показывает анализ, является бадминтонная модель (Рисунок 1.13б). Её суть кратко изложена в главе 1. Применение этой схемы позволяет создать замкнутый циркуляционный контур без переделки уже существующих токамаков, что, несомненно, является одним из главных достоинств модели.

#### **4.4.1. Размещение лимитеров, диагностических устройств в камере токамака T-11M**

Схема расположения лимитеров токамака T-11M и диагностических устройств, использовавшихся в экспериментах, показана на Рисунках 2.2, 3.1. В данной серии экспериментов использовались горизонтальный и вертикальный литиевые лимитеры и графитовый горизонтальный лимитер.

Динамика поведения литиевых и водородных потоков, циркулирующих в области между плазмой и лимитерами, исследовалась методом регистрации рекомбинационного излучения на графитовом лимитере. В дополнение к вышеописанному диагностическому оборудованию в экспериментах была использована скоростная камера с временным разрешением 4 мс. Снимки, полученные с этой камеры, показаны на Рисунке 4.10. Они ясно доказывают принципиальную возможность функционирования бадминтонной модели. На снимках видно, что нейтральный литий проникает вглубь плазмы не более, чем на 1 см вдоль и поперёк магнитного поля. В то же время имеет место глубокое

проникновение лития вглубь SOL (яркое свечение распространяется вдоль боковой поверхности горизонтального лимитера на 5 см).

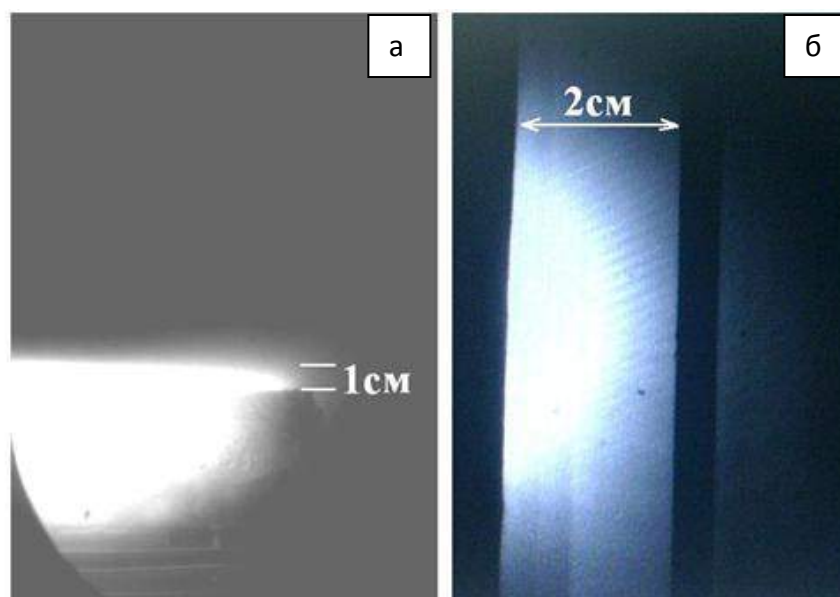


Рисунок 4.10. Снимки интенсивности свечения линии нейтрального лития вблизи поверхности горизонтального (а) и вертикального (б) лимитеров в квазистационарной фазе разряда Т-11М

#### 4.4.2. Определение оптимального радиального смещения коллектора относительно эмиттера

В процессе реализации замкнутой литиевой циркуляционной петли с помощью бадминтонной модели возникает вопрос выбора оптимального радиального смещения коллектора относительно эмиттера. Как показали ранние эксперименты [39], литий в SOL распространяется на глубину в несколько сантиметров, и эта величина определяется двумя противоборствующими процессами:

- 1) захват лития поверхностью коллектора;
- 2) распыление лития пучками электронов и ионов, приходящих из плазмы.

Однако в проведённых экспериментах литий мог осаждаться не только в результате рабочего импульса токамака, но и в ходе предварительного кондиционирования стенок вакуумной камеры. Для подтверждения предположения о том, что основной поток лития идёт именно с лимитера был проведён специальный эксперимент. Его суть заключалась в измерении литиевого потока с вертикального литиевого лимитера на горизонтальный графитовый лимитер.

Начальная конфигурация лимитеров: вертикальный лимитер выступает в роли главного ( $r=20$  см), графитовый — в его тени ( $r=24$  см). После двух импульсов вертикальный лимитер убирается в патрубок, а графитовый становится главным. Для его «очистки» от осажденного на нем лития достаточно 1 – 2 импульса при использовании его в качестве основного лимитера токамака T-11M. Результаты эксперимента приведены на Рисунке 4.11. По оси абсцисс — номера импульсов токамака, по оси ординат — интенсивность литиевой (LiC) и водородной ( $H_\alpha C$ ) эмиссии в относительных единицах, а также плотность плазмы  $\langle N_e \rangle$ , усредненная по радиусу шнура. Все величины — для квазистационарной фазы разряда.

В импульсах 309781 – 83 графитовый лимитер находится в тени вертикального литиевого в роли «коллектора» и рекомбинационной мишени. Перед импульсом 84 вертикальный лимитер убирается в патрубок, а графитовый вводится в плазму. В процессе импульса 84 имеет место так называемая «вспышка». Видно, что поток лития резко падает, немного снижается плотность плазмы и поток водорода. Рассмотрение кривой литиевой эмиссии в пятикратном масштабе выявляет наличие её локального увеличения. Данный факт указывает на то, что это литий, осевший на графитовом лимитере в 2х предыдущих импульсах. На Рисунке 4.12 это локальное увеличение выделено с помощью преобразования: показана зависимость безразмерной величины, образованной делением разности  $\Delta u$  между первым ( $u_1$ ) и вторым ( $u_2$ ) литиевыми сигналами после «вспышки» на полусумму  $u_1+u_2$ , от глубины смещения графитового лимитера в тень вертикального литиевого. Также на

Рисунке 4.12 приведена зависимость количества отложенного лития на боковых стенках горизонтального лимитера (кривая №2), полученная в ходе экспериментов, описанных в работе [39].

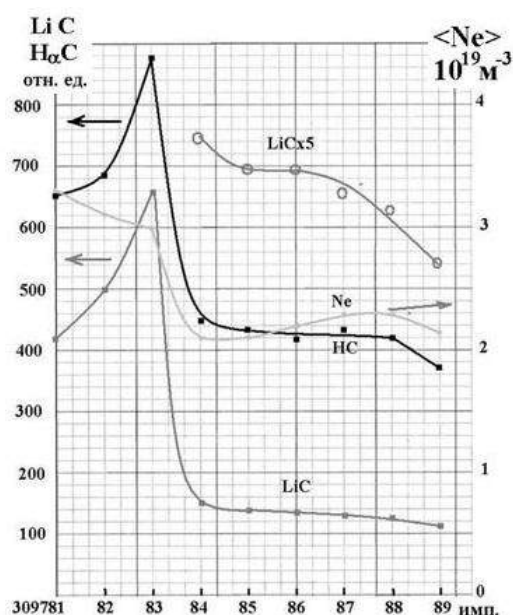


Рисунок 4.11. Эмиссия лития и водорода с поверхности графитового лимитера

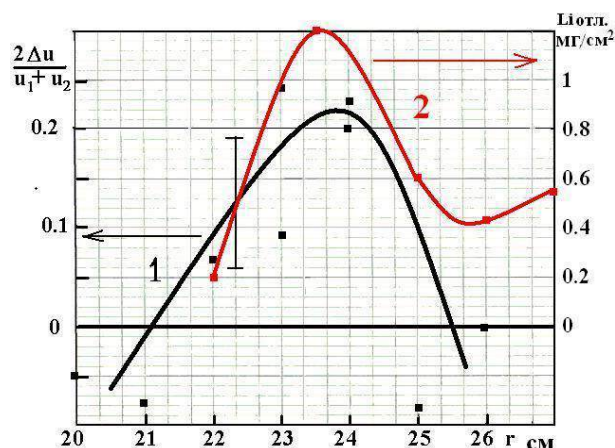


Рисунок 4.12. Кривая №1 – распределение лития в тени вертикального литиевого лимитера, полученное «методом вспышки», кривая №2 – количество отложенного лития на боковых стенках горизонтального лимитера из [39]

Анализ двух кривых показывает, что наибольшее количество лития находится в зоне 22...25 см, однако при  $r > 25$  см характер кривых различается. Такое различие можно объяснить наличием лития, осевшего на стенки вакуумной камеры в процессе её кондиционирования.

Резюмируя, можно утверждать, что для экспериментов с вертикальным, горизонтальным литиевыми лимитерами токамака Т-11М оптимальное смещение коллектора относительно эмиттера составляет 3...4 см по  $r$ . Такое радиальное смещение обеспечивает нахождение коллектора в зоне с максимальным количеством эмитированного лития.

#### **4.4.3. Эксперименты по определению радиального распределения лития в SOL при использовании вертикального литиевого лимитера на токамаке T-11M**

Были проведены эксперименты по определению радиального распределения лития при использовании вертикального лимитера (аналогичные проведённым для кольцевого лимитера — Рисунок 4.7). Результаты представлены на Рисунке 4.13. Показаны распределения от одиночного вертикального лимитера и от совместного использования вертикального и горизонтального лимитера. В первом случае характерная длина спада равна 3,5 см, во втором — 2,5 см. Сравнение Рисунка 4.13 с Рисунком 4.7 показывает, что характерная длина спада в случае с вертикальным лимитером увеличивается по сравнению с горизонтальным. Это можно объяснить увеличением площади открытой литиевой поверхности. Примечателен результат совместного использования двух лимитеров: полученная длина спада меньше, чем в случае одиночного применения лимитеров. Это означает, что имеет место эффект мультипликативности, что даёт возможность регулировать распространение лития вглубь SOL простым изменением количества лимитеров.

Также был поставлен эксперимент по определению радиального распределения лития в SOL при использовании «горячего» (нагретого выше температуры плавления лития) и «холодного» (нагретого ниже температуры плавления лития) вертикального лимитера. Результаты показаны на Рисунке 4.14. Отчётливо видно, что в случае «холодного» лимитера характерная длина спада ниже, чем в случае «горячего» лимитера. Это объясняется уменьшением эмиссионной способности концов вертикального лимитера. Данный эффект, как и мультипликативность, можно использовать в будущих работах по профилированию потоков лития в SOL токамаков.



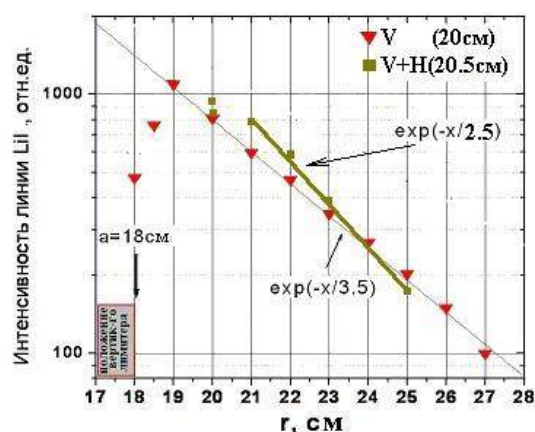


Рисунок 4.13. Радиальное распределение эмитированного лития при использовании вертикального (V) и вертикального с горизонтальным (V+H) лимитеров

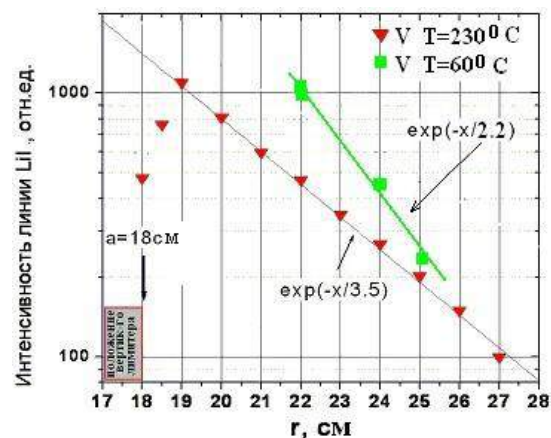


Рисунок 4.14. Радиальное распределение эмитированного лития при использовании «горячего» ( $T=230^{\circ}\text{C}$ ) и «холодного» ( $T=60^{\circ}\text{C}$ ) вертикального лимитера

#### 4.4.4. Эксперименты с переменным использованием горизонтального и вертикального лимитеров в роли «эмиттера» и «коллектора»

Появление вертикального литиевого лимитера в дополнение к горизонтальному в составе токамака Т-11М позволило провести испытание бадминтонной модели. Было поставлено два эксперимента.

В первом эксперименте роль эмиттера выполнял вертикальный лимитер, роль коллектора — соответственно горизонтальный ( $r=23$  см). На Рисунке 4.15 показаны распределения лития по радиусу для одиночного вертикального лимитера и для случая, соответствующего эксперименту. Видно, что при  $r=23$  см имеет место «излом», который свидетельствует об изменении характерной длины спада лития в данном случае с 3,5 до 2 см. Такое уменьшение говорит о более эффективном захвате эмитированного лития на отрезке  $r>23$  см. Это прямое доказательство сбора лития горизонтальным лимитером.



После 10 рабочих импульсов горизонтальный лимитер вводится в плазму ( $r=20$  см), а вертикальный убирается в патрубок. Следующие за этим два разряда реализуют вышеописанный метод «вспышки», однако в случае с литиевым лимитером увеличение эмиссии лития не предполагалось (она строгая функция температуры литиевой поверхности). В этих разрядах ожидался всплеск водородной эмиссии (атомов водорода захваченных в процессе осаждения эмитированного лития на коллектор). Такой всплеск был зафиксирован. Наравне с ним было зафиксировано падение литиевой эмиссии, что можно связать с падением температуры около литиевой поверхности в результате выброса водорода. На Рисунке 4.16 показана эволюция эмиссии лития и водорода в первом (сплошная линия) и во втором (пунктирная линия) разрядах после изменения положения лимитеров (после накопления лития горизонтальным лимитером).

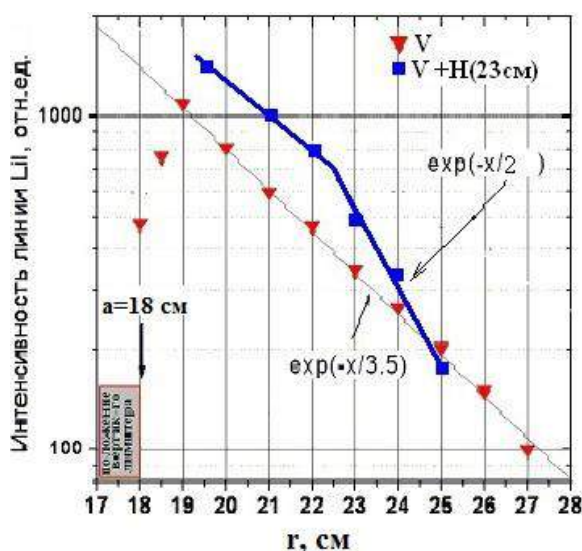


Рисунок 4.15. Распределение лития по радиусу для одиночного вертикального и комбинации вертикального ( $r=20$  см) и горизонтального ( $r=23$  см) литиевых лимитеров

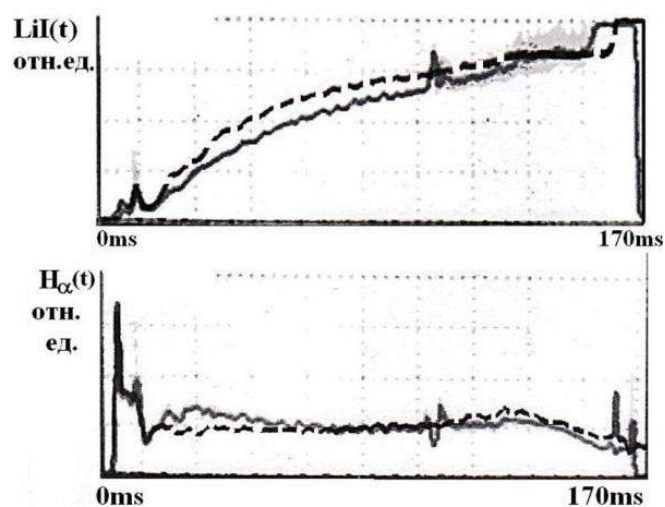


Рисунок 4.16. Развитие эмиссионных потоков лития и водорода горизонтального литиевого лимитера во время «первого» (сплошная) и «второго» (пунктир) рабочих импульсов после изменения положения лимитеров

Второй эксперимент был аналогичен первому, только вначале в качестве эмиттера выступал горизонтальный лимитер ( $r=20$  см), вертикальный находился в его тени ( $r=23$  см). После 10 разрядов лимитеры менялись ролями, и в первых двух разрядах фиксировалась эмиссия лития и водорода с поверхности нового эмиттера. Эксперимент ставился как с «холодным» ( $T=60^{\circ}\text{C}$ ), так и с «горячим» ( $T=230^{\circ}\text{C}$ ) вертикальным лимитером. В результате экспериментов с «горячим» коллектором литиевая эмиссия не изменилась после 10 разрядов, однако в случае с «холодным» — заметно снизилась (на 10 – 20%) с последующим восстановлением во втором разряде. Данное «проседание» литиевой эмиссии в случае «холодного» коллектора можно объяснить наличием примесей в эмитированном литии (на момент проведения экспериментов поверхность горизонтального лимитера была отравлена примесями, которые отложились там за 2 года работы). В случае «горячего» коллектора все примеси растворялись в литии и не давали эффекта «проседания» эмиссии. Это объяснение подтверждается поведением рентгеновского излучения. В рабочих импульсах с горизонтальным литиевым лимитером рентгеновский сигнал существенно выше, чем в импульсах с относительно новым вертикальным лимитером.

#### **4.4.5. Результаты экспериментальной кампании**

После окончания экспериментальной кампании литиевые лимитеры были извлечены из вакуумной камеры токамака Т-11М. Фотографии отработавших лимитеров показаны на Рисунках 4.17 и 4.18. Показаны фото лимитеров извлечённые после 1000 разрядов (4.17а и 4.18а) и лимитеры после полного истощения запаса лития (4.17б, в и 4.18б, в). Видно, что в первом случае литиевая поверхность обоих лимитеров находится в рабочем состоянии. Во втором случае же видны характерные разрушения КПС, причём интересно отметить, что повреждения КПС (белые пятна на фотографиях) дают нам

отчётливую картину горячих зон лимитеров. Как и показал расчёт самая близкая точка к плазме лимитера («верхушка») не испытала разрушений, а самые энергонапряжённые зоны — отвечают центральному углу лимитера  $\approx 45...60^\circ$ . Также снимки подтверждают утверждение, что электронная сторона подвергается большей нагрузке как тепловой, так и от бомбардировки частицами, в том числе и ускоренными пучками релятивистских электронов.

Наблюдения за вертикальным лимитером в процессе экспериментов показали полное удержание лития капиллярно-пористой системой, несмотря на опасения стекания в начале проектирования.



а



б



в

Рисунок 4.17. Горизонтальный литиевый лимитер после извлечения из вакуумной камеры после 1000 разрядов (а), после окончания всей экспериментальной кампании — электронная сторона (б), ионная сторона (в)



а



б



в

Рисунок 4.18. Вертикальный литиевый лимитер после извлечения из вакуумной камеры после 1000 разрядов (а), после окончания экспериментальной кампании — ионная и электронная стороны (б), электронная сторона укрупнённо (в)

Основные результаты экспериментальной кампании:

1) продемонстрирована принципиальная возможность создания замкнутого литиевого циркуляционного контура в рамках бадминтонной модели;

2) определено оптимальное смещение коллектора относительно эмиттера при реализации бадминтонной модели. Величина смещения — 3...4 см;

3) определены распределения эмитированного лития в SOL в случае одиночного вертикального и в различных конфигурациях комбинированного лимитера (горизонтальный + вертикальный), в том числе при различных температурах вертикального лимитера;

4) установлен эффект мультипликативности, который позволяет управлять профилем распределения лития в SOL изменяя число работающих лимитеров;

5) показано, что начальная температура коллектора напрямую влияет на распределение лития в SOL, что связывается с его эмиссионными характеристиками;

6) показано, что в случае «холодного» коллектора критичным для реализации бадминтонной модели может стать наличие примесей в эмитированном литии, которые переизлучают, охлаждают периферию и, тем самым, снижают величину литиевой эмиссии;

7) в случае «горячего» коллектора подобным образом себя ведёт водород, однако уменьшение литиевой эмиссии имеет место только в начальной фазе разряда;

8) подтверждены расчёты зон максимального энерговыделения приёмной поверхности лимитеров;

9) доказано полное удержание лития капиллярно-пористой системой вертикального лимитера.

#### **4.5. Первые эксперименты с продольным литиевым лимитером**

Цель исследования — продолжение экспериментов с литиевыми лимитерами для оптимизации распределения литиевого профиля в SOL. Данный этап исследований предусматривает эксперименты с продольным лимитером (как в качестве главного, так и в качестве дополнительного, размещённого в тени вертикального).

##### **4.5.1. Размещение лимитеров, диагностических устройств в камере токамака T-11M**

Схема расположения лимитеров токамака T-11M и диагностических устройств, использовавшихся в экспериментах, показана на Рисунках 2.2, 3.1. В данной серии экспериментов использовались продольный и вертикальный литиевые лимитеры и графитовый горизонтальный лимитер.

Динамика поведения литиевых и водородных потоков, циркулирующих в области между плазмой и лимитерами, исследовалась методом регистрации рекомбинационного излучения на графитовом лимитере.

##### **4.5.2. Эксперименты по определению радиального распределения лития в SOL при использовании продольного и вертикального литиевых лимитеров на токамаке T-11M**

Радиальное распределение лития в SOL токамака в проведённых экспериментах показано на Рисунке 4.19 [70]. Эксперименты показали, что при использовании продольного лимитера в качестве эмиттера лития, а вертикального — в качестве коллектора характерная длина спада литиевых потоков в SOL составляет 2,9 см. При изменении ролей лимитеров (продольный в роли коллектора, вертикальный в роли эмиттера) характерная длина спада уменьшалась до 1,5 см. Все кривые на Рисунке 4.19 имеют «излом», связанный

с действием коллектора. Однако по сравнению с экспериментами с горизонтальным и вертикальным лимитерами видно, что введение продольного в качестве коллектора сильнее уменьшает длину спада потоков лития в периферийной части плазмы, хотя в пристеночной области этот показатель даже немного возрос. Для оптимизации бадминтонной модели наиболее критичен показатель спада в периферийной плазме, поэтому его увеличение у стенки токамака, связанное, видимо, с увеличением эмиссионной способности удлинённых концов продольного лимитера, не столь проблематично.

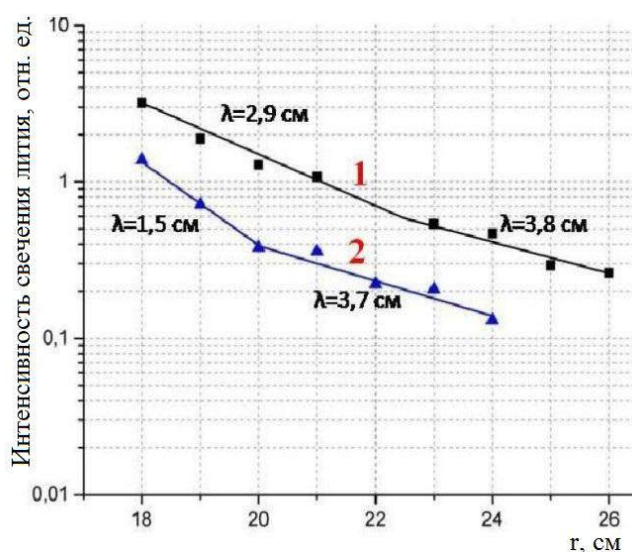


Рисунок 4.19. Радиальное распределение эмитированного лития в экспериментах с продольным лимитером: кривая 1 – продольный лимитер в роли эмиттера, вертикальный – в роли коллектора, кривая 2 – вертикальный лимитер в роли эмиттера, продольный – в роли коллектора

Также, в экспериментах с продольным лимитером были подтверждены расчёты увеличения температуры за разряд, и, соответственно, расчёты приходящей мощности: за разряд средняя температура лимитера, измеренная термопарами, повышалась на  $\approx 6^\circ\text{C}$ , в расчётах максимальное увеличение температуры —  $\approx 10^\circ\text{C}$ .

На Рисунке 4.20 приведены фотографии продольного литиевого лимитера в процессе разряда. Фотографии были сделаны с помощью скоростной цветной камеры с временным разрешением 4 мс.

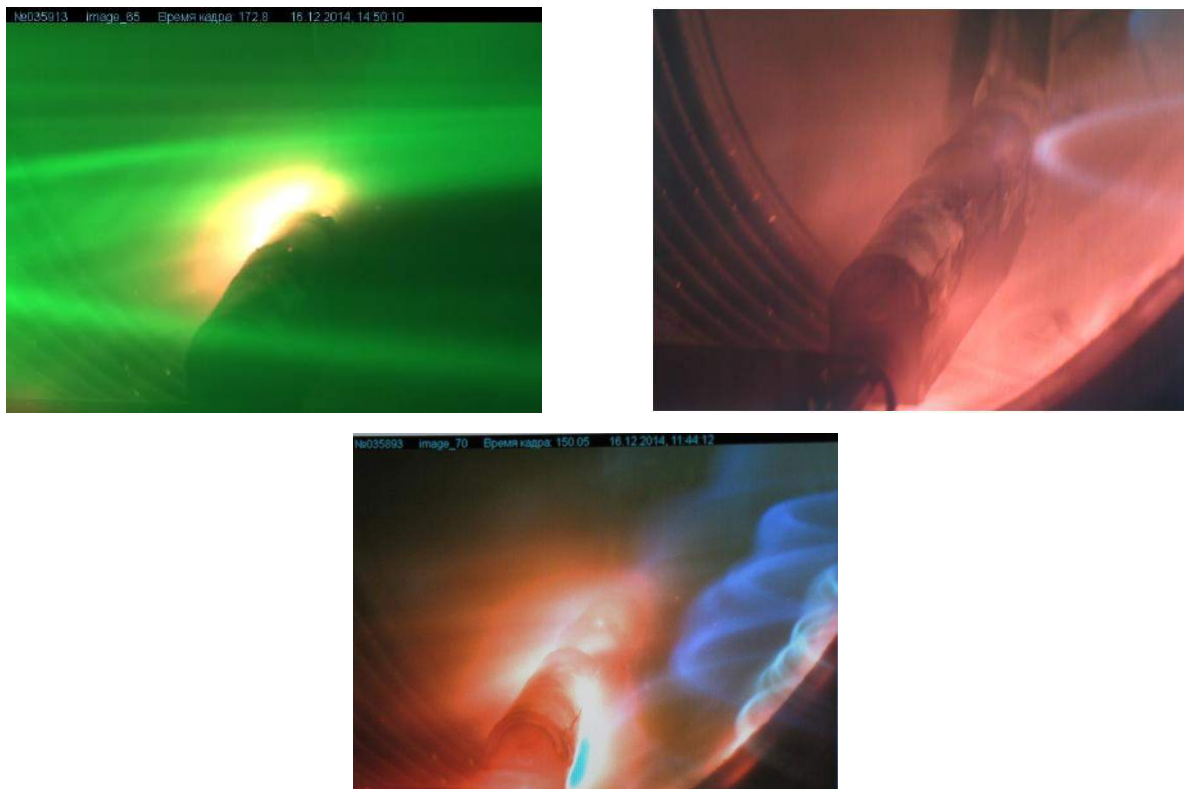


Рисунок 4.20. Снимки продольного лимитера в процессе разряда: а – квазистационарная фаза разряда, б – конец разряда, в – бомбардировка релятивистскими электронами (срыв разряда). Розовый цвет – свечение нейтрального лития, зелёный – некорональное излучение ионов лития

#### **4.5.3. Схема стационарного термоядерного реактора с использованием литиевых лимитеров**

Проведённые эксперименты позволили выстроить схему стационарного термоядерного реактора (Рисунок 4.21). В соответствие с ней роль коллектора исполняют некоторое число продольных лимитеров, а эмиттера — вертикальный лимитер. В данном исполнении ведение дополнительных коллекторов решает проблему завышенной длины спада лития (эффект



мультипликативности). Замыкание контура в данной схеме предполагается с помощью электромагнитного насоса с попутным извлечением из него захваченного трития и дейтерия простым прогревом. Откачка гелия осуществляется с помощью обычных насосов напрямую из вакуумной камеры [71].

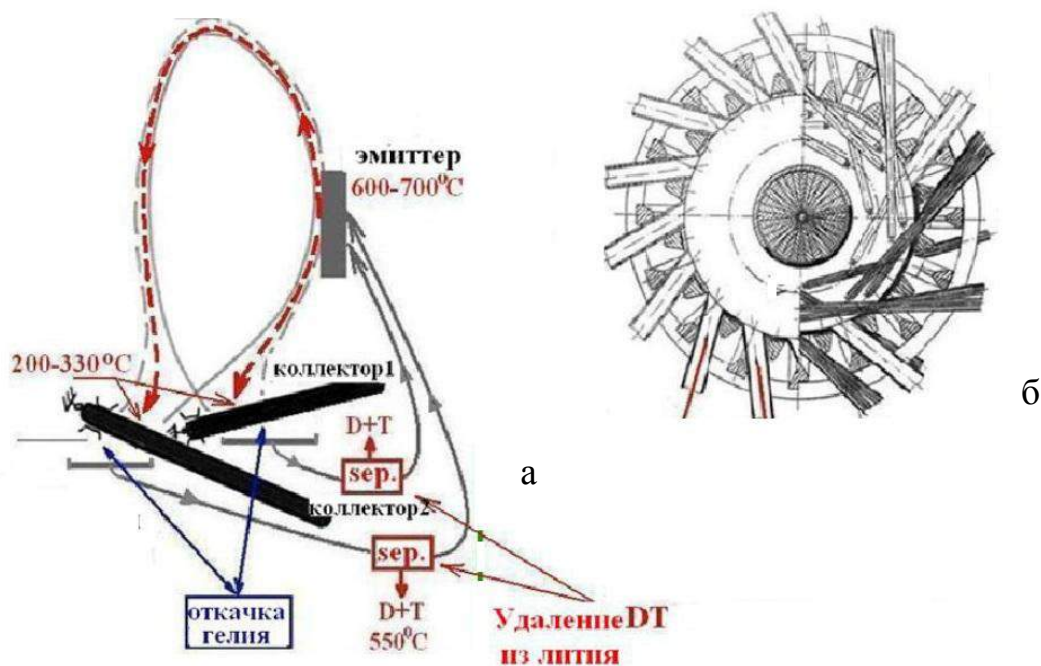


Рисунок 4.21. Схема предполагаемого стационарного термоядерного реактора на основе внутрикамерных литиевых устройств: а – принцип работы, б – расположение коллекторов (вид сверху)

Резюмируя можно сказать:

1) проведённые эксперименты с продольным и вертикальным литиевыми лимитерами показали наиболее оптимальное сочетание для стационарного реактора — продольный в качестве коллектора, вертикальный в качестве эмиттера;

2) полученное значение характерного спада лития в SOL  $\lambda = 1,5$  см планируется уменьшить до  $\lambda = 1$  см с помощью ввода дополнительных коллекторов (используя эффект мультипликативности).



#### **4.6. Эксперименты по сбору лития криогенной мишенью**

Цель исследования — демонстрация предложенного ранее [67] метода очистки стенок разрядной камеры тлеющим разрядом с последующим сбором лития криогенной мишенью, определение эффективности этого метода в зависимости от использования различных рабочих газов, нагрева стенок камеры, подачи разности потенциалов между мишенью и камерой, начальной чистоты стенок, а также проведение экспериментов, в которых криогенная мишень выступает в роли коллектора в штатном разряде токамака.

##### **4.6.1. Схема экспериментов**

Схема эксперимента показана на Рисунке 4.22. Криогенная мишень вводится через горизонтальный патрубок в экваториальной плоскости. Для организации тлеющего разряда в вакуумную камеру вводится дополнительный молибденовый электрод, роль второго электрода выполняет криогенная мишень. Стенки разрядной камеры изолированы от криомишени. Количество собранного лития (основной параметр, определяемый в экспериментах, через который определялась эффективность метода) определялось с помощью вышеописанного метода химического титриметрического анализа. Также в экспериментальной кампании был задействован масс-спектрометр. Для проведения экспериментов по определению эффективности работы криомишени в присутствии паров воды был создан калиброванный источник (будет описан ниже).

##### **4.6.2. Эксперименты по определению эффективности сбора лития криогенной мишенью в зависимости от вакуумных условий**

Эффективность любого способа сбора лития (в том числе и криогенной мишенью) определяется балансом атомов лития, захваченных и эмитируемых

(например, в результате распыления) приёмной поверхностью коллектора. В ходе ранних экспериментов [72] была получена зависимость эмиссионных способностей литиевого лимитера от температуры (Рисунок 4.23). Можно отчётливо видеть, что в области криогенных температур эмиссия лития резко падает. Было выдвинуто предположение, что при таких температурах приёмная поверхность очень эффективно сорбирует пары воды, которые в свою очередь «отравляют» литиевую поверхность, тем самым предотвращая поступление лития в разрядную камеру.

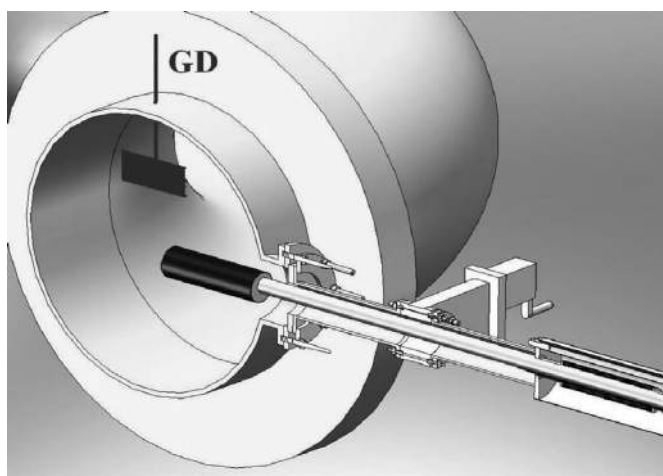


Рисунок 4.22. Схема экспериментов с криогенной мишенью. GD – электрод тлеющего разряда

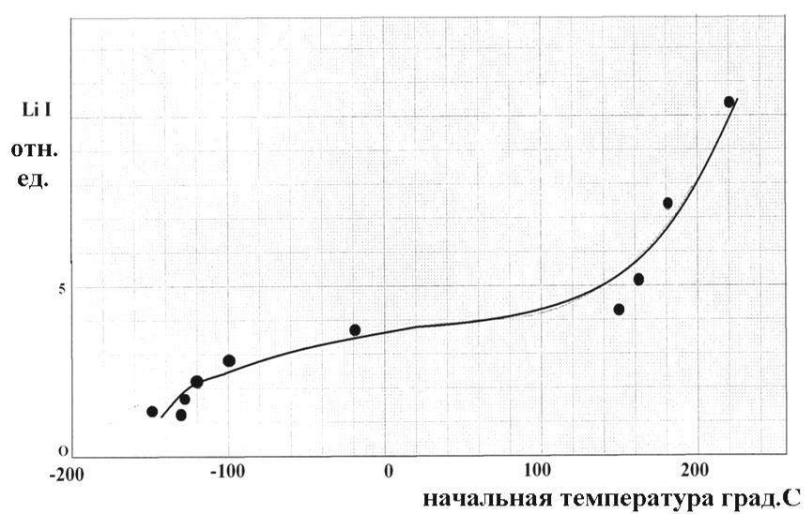


Рисунок 4.23. Литиевая эмиссия с поверхности лимитера, полученная в ходе ранних экспериментов

На Рисунке 4.24а показана эволюция давления паров воды в остаточной атмосфере токамака после введения захлажденной криомишени. Характер изменений — двухэкспоненциальный (с характерными временами 3 и 25 мин). На Рисунке 4.24б показана эволюция давления паров воды в остаточной атмосфере токамака после удаления криомишени из вакуумной камеры токамака. Видно, что давление стало расти (характерное время — 75 мин). Проведённые опыты [73, 74] ясно указали на эффективность криогенной мишени в отношении паров воды. Предположение о положительной роли паров воды в процессе захвата лития криомишенью подтвердилось серией последовательных экспериментов [75], в которых реализовывался процесс очистки закрытой камеры после её разгерметизации. Температура стенок камеры во время проведения экспериментов составляла  $30 \pm 10^\circ\text{C}$ , в каждом случае мишень экспонировалась в течение 4х часов в условиях тлеющего разряда на водороде (потенциал электрода тлеющего разряда относительно стенок  $\approx +400$  В, ток  $\approx 5$  А, криогенная мишень под потенциалом стенки). На Рисунке 4.25 представлены результаты проведённых экспериментов. По оси абсцисс — номер эксперимента, по оси ординат — скорость сбора лития. Видно, что по мере улучшения вакуумных условий скорость сбора падает. В эксперименте №2 для контроля использовалась криомишень без жидкого азота. В результате было получено вполне ожидаемое резкое уменьшение скорости сбора.

Следующим этапом исследований стало выявление конкретной зависимости скорости сбора лития от давления паров воды. Для этой цели был разработан калиброванный источник паров воды (Рисунок 4.26). Содержание паров воды в камере регулировалось напускным клапаном и контролировалось масс-спектрометром.

В процессе экспериментальной кампании был проведён ряд экспериментов по определению скорости сбора лития при различных давлениях паров воды и температурах стенки токамака  $12^\circ\text{C}$  и  $190^\circ\text{C}$ . Результаты

представлены на Рисунке 4.27. Добавление паров воды в пределах от  $6 \cdot 10^{-5}$  Па до  $2 \cdot 10^{-3}$  Па позволяет в 4 – 5 раз увеличить скорость сбора лития криогенной мишенью. Превышение предела  $3 \cdot 10^{-3}$  Па приводит к срыву разряда и, соответственно, сбора лития. Как и ожидалось, прогрев камеры увеличивает эффективность криомишени [76]. На Рисунке 4.28 показан вид приёмной части криомишени после экспериментов при «низком» и «высоком» вакууме.

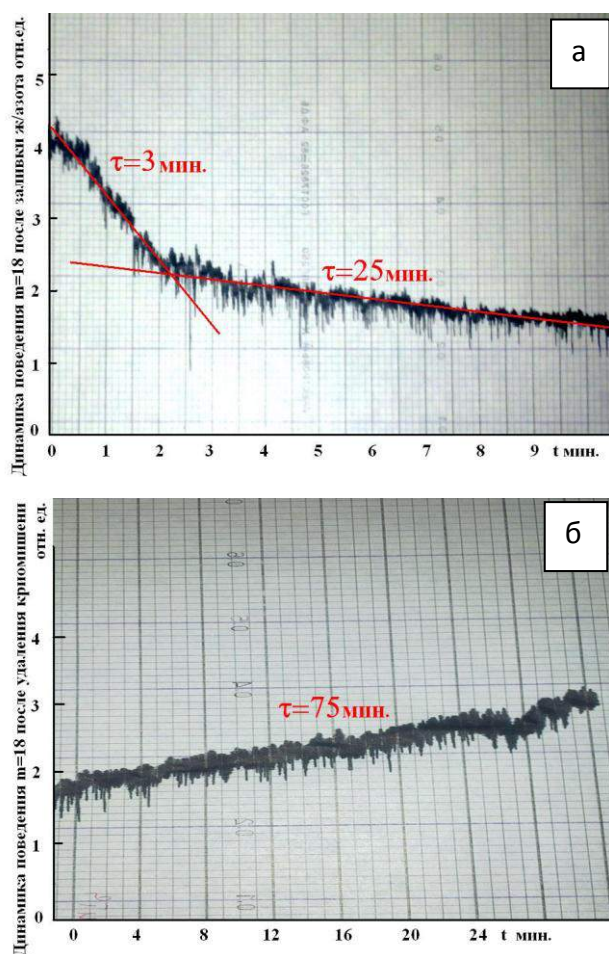


Рисунок 4.24. Динамика поведения давления паров воды после заливки жидкого азота в криомишень (а) и после её удаления (б)

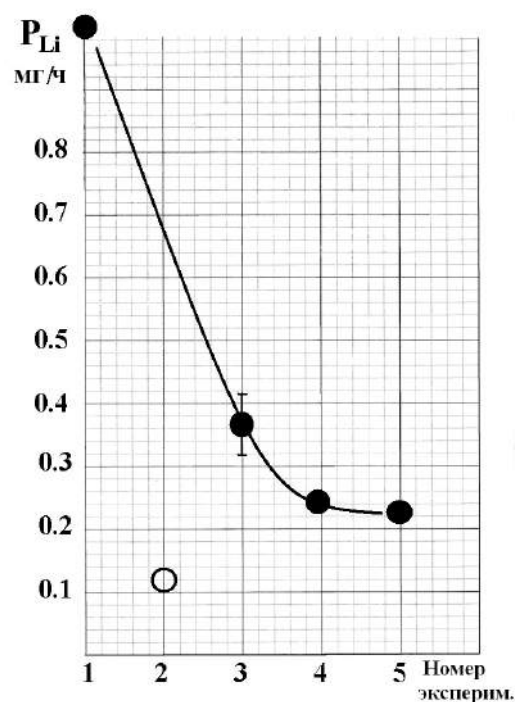


Рисунок 4.25. Динамика скорости сбора лития криомишенью по мере улучшения вакуумных условий

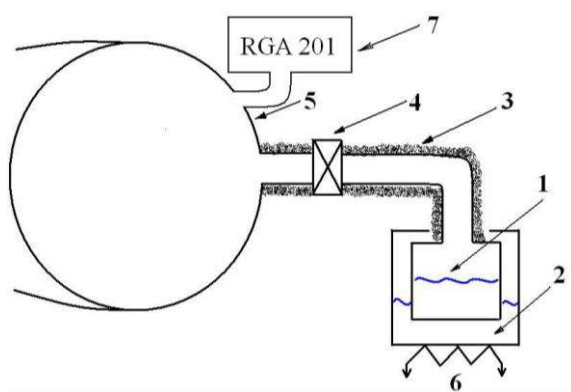


Рисунок 4.26. Калиброванный источник паров воды: 1 – резервуар с водой, 2 – термостат, 3 – трубопровод, 4 – напускной клапан, 5 – вакуумная камера токамака, 6 – нагреватель, 7 – масс-спектрометр

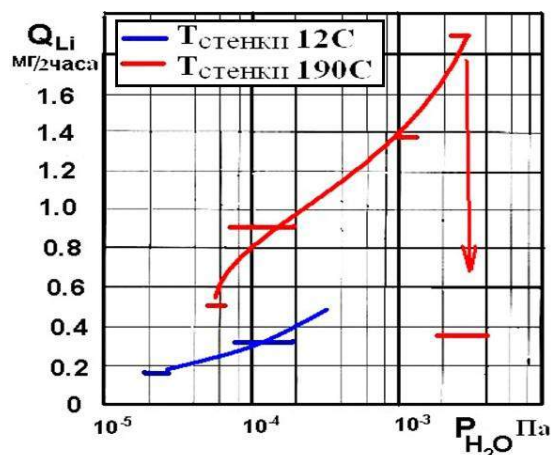


Рисунок 4.27. Влияние водяных паров на сбор лития во время водородного тлеющего разряда



Рисунок 4.28. Вид приёмной части криомишени после экспериментов при «низком» (слева) и «высоком» (справа) вакууме

#### 4.6.3. Исследование влияния температуры стенок разрядной камеры на эффективность сбора лития

Логическим продолжением проведённых экспериментов стало исследование влияния температуры стенок камеры на процесс сбора [75, 76]. Результаты исследования представлены на Рисунке 4.29.

Температура стенок вакуумной камеры контролировалась с помощью термопар и локально с помощью ИК-термометра. Однако необходимо

принимать во внимание, что температура стенки в этом исследовании величина условная, так как многие элементы токамака (патрубки, выводы вакуумной откачки и др.) имеют температуру значительно ниже средней. Распределение температуры камеры токамака вдоль ее обхода по азимуту при максимальной температуре 200°C показано на Рисунке 4.30. Возвращаясь к результатам экспериментов (Рисунок 4.29), можно утверждать, что прогрев камеры однозначно увеличивает эффективность сбора лития (в первую очередь из-за термодесорбции). В данных экспериментах криомишень находилась под потенциалом камеры.

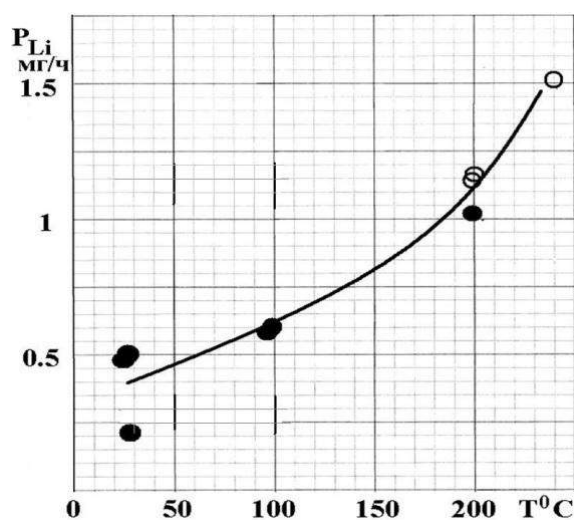


Рисунок 4.29. Зависимость скорости сбора лития от температуры стенки разрядной камеры

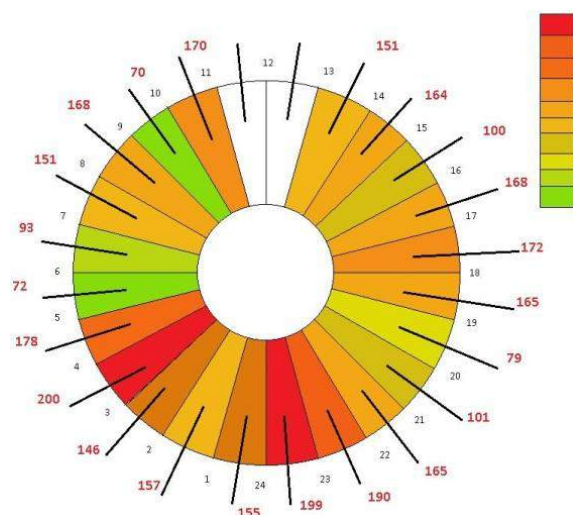


Рисунок 4.30. Распределение температуры камеры токамака

#### 4.6.4. Исследование влияния рабочего газа тлеющего разряда на эффективность сбора лития

Следующий параметр, который может влиять на эффективность процесса сбора лития — вид плазмообразующего газа тлеющего разряда. Были проведены эксперименты с использованием в качестве рабочего газа водорода,

гелия, аргона и азота (остальные параметры при этом были фиксированы) [75, 76]. Результаты проведённых экспериментов представлены на Рисунке 4.31.

На представленных результатах видно, что скорость сбора максимальна в случае тлеющего разряда на азоте (4,4 мг/ч), в случае тлеющего разряда на водороде скорость падает примерно в 2 раза (2,2 мг/ч), применение гелия и аргона снижает скорость ещё сильнее (1,2 и 1,5 мг/ч соответственно). Полученные результаты можно объяснить различной скоростью распыления лития различными атомами. Эта величина существенно выше при бомбардировке тяжёлыми ионами (в нашем случае гелия и аргона). Таким образом, по сравнению с тлеющим разрядом на водороде, имеет место повышенный обратный поток атомов лития. Повышенная эффективность тлеющего разряда на азоте по сравнению с водородом (Рисунок 4.31б) объясняется тем фактом, что приходящий азот вступает в реакцию с литием, связывая его (аналогично действию паров воды) и предотвращая его распыление (эксперимент №4 — незахоложенная мишень).

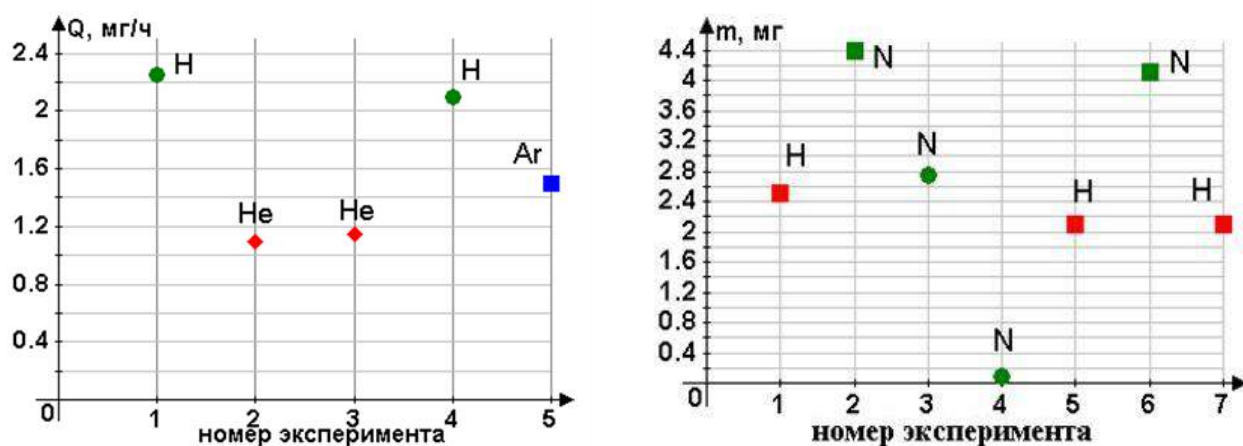


Рисунок 4.31. Сравнение эффективности сбора лития в зависимости от вида плазмообразующего газа тлеющего разряда



#### 4.6.5. Исследование влияния электрических и магнитных полей на эффективность сбора лития

Данная серия экспериментов [75, 76] была направлена на выявление состояния атомов лития в процессе сбора, так как изначально не было ясности ионизированный или нейтральный литий улавливается мишенью.

В ходе экспериментов с введением электрического поля на мишень относительно камеры подавался потенциал (от минус 300 В до плюс 300 В), электрод тлеющего разряда имел постоянный потенциал относительно камеры плюс 400 В. Полученные результаты показаны на Рисунке 4.32 увеличение отрицательного потенциала криомишени относительно стенки камеры в 1,3 – 1,5 раза повышает эффективность сбора лития по сравнению со случаем когда криомишень находится под потенциалом стенки и в 3 раза по сравнению со случаем когда криомишень находится под положительным потенциалом относительно стенки. Как видно, исследуемая зависимость ведёт себя аналогично на гелии и водороде, однако в области отрицательных потенциалов вблизи 300 В имеет место спад эффективности, что можно объяснить увеличением распыления лития вследствие увеличения энергии приходящих ионов гелия.

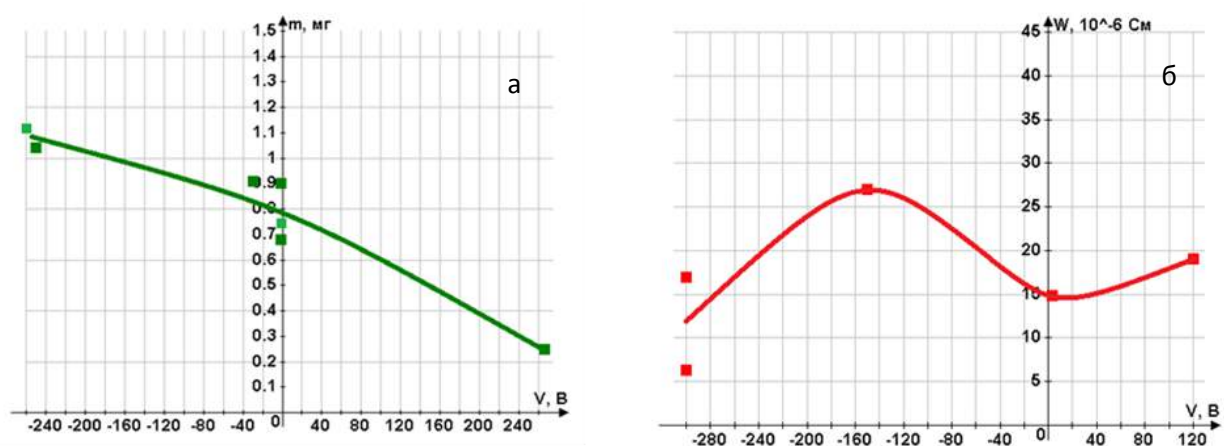


Рисунок 4.32. Эффективность сбора лития в зависимости от разности электрических потенциалов между стенкой Т-11М и криогенной мишенью в случае тлеющего разряда на водороде (а) и гелии (б)



Проведённый эксперимент [77] с введением тороидального магнитного поля порядка  $5 \cdot 10^{-3}$  Тл (при больших значениях разряд срывался) также показал увеличение скорости сбора в 3 – 4 раза.

Полученные результаты явно указывают на тот факт, что литий в процессе сбора находится в ионизованном состоянии. Это даёт возможность управлять скоростью сбора лития с помощью магнитного и электрического полей.

#### **4.6.6. Эксперименты с криогенной мишенью в режиме штатной работы токамака**

Успешные эксперименты с литиевыми лимитерами по сбору лития в SOL токамака навели на мысль использовать криомишень в качестве коллектора ионов в штатном разряде. Серия экспериментов [75] показала эффективность этого устройства в условиях плазменного разряда и подтвердила ранние результаты экспериментов по сбору лития боковыми сторонами горизонтального лимитера [54]. На Рисунке 4.33 представлена схема экспериментов: криогенная мишень находилась в тени вертикального литиевого лимитера. На Рисунке 4.34 — результаты.

Другая серия экспериментов [75] была направлена на определение количества лития, захваченного мишенью после длительной экспозиции в разряде. На Рисунке 4.35 показано интегральное количество собранного лития после 200 разрядов (что эквивалентно непрерывной работе токамака в течение 30 с). Видно, имеет место растущая со временем зависимость, что является серьёзным аргументом для использования криомишени в качестве коллектора лития в стационарных токамаках.

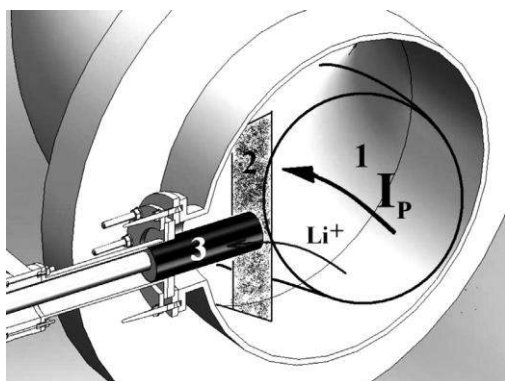


Рисунок 4.33. Схема проведения экспериментов с криомишенью в условиях штатного разряда: 1 – плазма, 2 – лимитер, 3 – криомишень

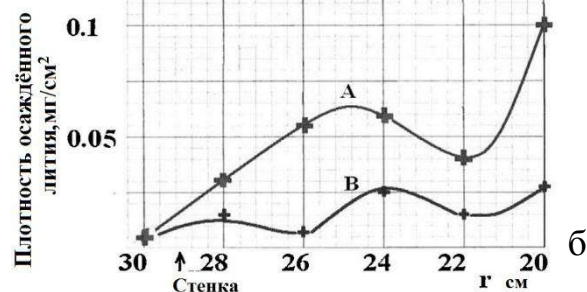
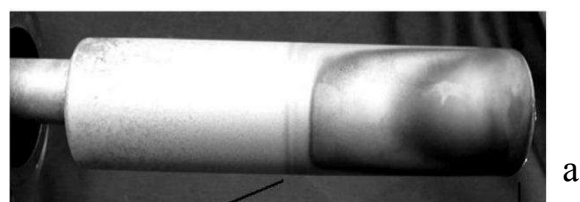


Рисунок 4.34. Результаты экспериментов с криомишенью в условиях штатного разряда токамака: а – внешний вид приёмной поверхности («ионная» сторона), б – радиальное распределение захваченного лития для «ионной» (A) и «электронной» (B) сторон

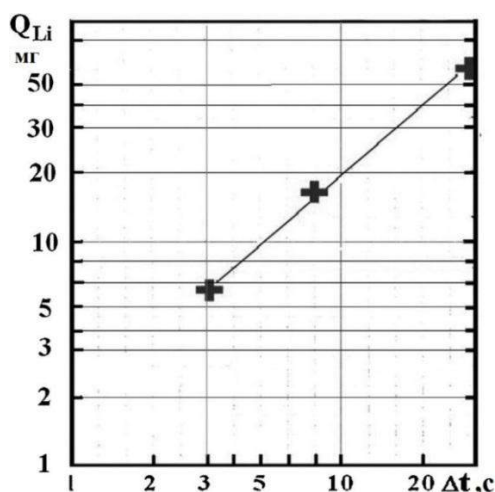


Рисунок 4.35. Результаты экспериментов с криомишенью в условиях штатного разряда токамака: полное количество собранного лития в зависимости от времени экспозиции в плазме

#### 4.6.7. Результаты экспериментальной кампании

Основные результаты экспериментальной кампании следующие:

1) продемонстрирована работа криогенной мишени в условиях тлеющего и штатного разряда токамака, показано явное увеличение эффективности сбора лития охлаждённой мишенью ( $T=-196^{\circ}\text{C}$ ) по сравнению с неохлаждённой ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ), что позволяет осуществить процесс очистки в течение 4 часов (обычный метод очистки без криогенной мишени занимает 1 месяц) [68];

2) установлено положительное влияние «плохого» вакуума на скорость сбора лития криогенной мишенью. Это связывается с взаимодействием остаточных паров воды с захваченным литием. Данное предположение было подтверждено серией экспериментов с калиброванным источником;

3) установлено положительное влияние дополнительного нагрева стенок токамака на эффективность сбора лития;

4) был поставлен ряд экспериментов по сбору лития криомишенью в случае тлеющего разряда на различных газах (водород, гелий, аргон и азот). Установлено, что максимальная скорость сбора имеет место в случае азотного тлеющего разряда (4,4 мг/ч), далее идёт водородный тлеющий разряд (2,2 мг/ч), аргоновый (1,5 мг/ч) и гелиевый (1,2 мг/ч). Преимущество азотного тлеющего разряда заключается в том, что азот связывает литий, тем самым предотвращая обратные потоки. Низкая эффективность тлеющих разрядов на гелии и аргоне объясняется высокой степенью распыления лития вследствие высокой массы бомбардирующих ионов;

5) показано, что введение направленных электрических и магнитных полей может заметно увеличить скорость сбора лития. Данный факт указывает на то, что литий находится в ионизированном состоянии, что позволяет создать эффективный ионный насос;

6) проведены эксперименты с криогенной мишенью в условиях штатного разряда. Результаты показали целесообразность её использования в качестве коллектора лития в токамаках стационарного действия.

#### 4.7. Выводы по главе 4

Проведённые эксперименты с литиевыми устройствами на токамаке T-11M показали принципиальную возможность создания замкнутой литиевой циркуляционной петли для организации защиты стенок вакуумной камеры от воздействия горячей плазмы. Эксперименты с кольцевым лимитером показали малый расход лития (1,1 мг/с), что характеризует данный метод защиты внутрикамерных элементов как чрезвычайно экономный по отношению к рабочему веществу (за 1000 рабочих импульсов расходуется  $\approx 220$  мг лития). Введение вертикального литиевого лимитера в дополнение к горизонтальному позволило создать бадминтонную модель охлаждения периферийной плазмы. В этих экспериментах были получены радиальные распределения эмитированного лития, выявлено свойство мультипликативности литиевых коллекторов, показано влияние начальной температуры коллектора на распределение лития в SOL. Последующие эксперименты с продольным лимитером подтвердили полученные результаты и позволили выработать оптимальную схему охлаждения периферийной плазмы с помощью литиевых устройств в токамаках стационарного действия. Решение технологических вопросов эвакуации лития, осевшего на стенках разрядной камеры, продемонстрировано в опытах с криогенной мишенью. Показана эффективность этого метода (процесс очистки с помощью криогенной мишени занимает 4 часа, без криогенной мишени — 1 месяц) и определены все параметры, влияющие на неё, с целью максимизации скорости сбора лития. Проведённая конструкторская и экспериментальная деятельность ясно указывает на перспективность литиевых капиллярно-пористых систем как материала взаимодействующего с горячей плазмой токамака.

## **Глава 5. Исследование и внедрение новых перспективных конструкционных материалов для внутрикамерных литиевых устройств**

В настоящее время всё больше внимания к себе привлекают сплавы на основе ванадия. Основным преимуществом этих сплавов является пониженный уровень наведённой радиоактивности (т.н. «малоактивируемость») в сочетании с высокой жаропрочностью, низким удельным весом, высокой стойкостью в жидких теплоносителях и высокой теплопроводностью [78]. Комплекс свойств ванадиевых сплавов делает их незаменимыми в таких областях как космическая ядерная и термоядерная энергетика, в которых до недавнего времени в качестве основного конструкционного материала использовалась сталь аустенитного класса 12X18Н10Т. В частности, переход с нержавеющей стали на ванадиевые сплавы является целесообразным для внутрикамерных литиевых устройств с активным охлаждением эвтектическим сплавом Na-K в ИТЕР-подобных токамаках с высокой нейтронной нагрузкой как, например, модуль литиевого дивертора казахстанского материаловедческого токамака КТМ [79, 80]. Основным недостаток ванадиевых сплавов заключается в их чувствительности к неметаллическим примесям (азот, кислород, углерод), неизбежно присутствующим в щелочных металлах. В данной главе будет рассказано об исследованиях коррозионной стойкости ванадия и ванадиевых сплавов (в первую очередь ванадиевых сплавов с добавками хрома и титана) при их взаимодействии с литием и эвтектическим сплавом натрия с калием. Эти исследования подробно описаны в работах [49, 50, 51].

### **5.1. Исследование коррозионного взаимодействия ванадия и ванадиевых сплавов с жидким литием**

Цель исследования — исследование коррозионной стойкости в литии ванадиевых сплавов V – 1,86 Ga, V – 3,4 Ga – 0,62 Si и V – 4,8 Ti – 4,82 Cr в

сравнении с чистым ванадием. Исследовались необлученные и облучённые ионами аргона образцы. Исследование облучённых образцов обусловлено необходимостью проверки гипотезы о влиянии имплантированных ионов инертных газов на коррозионную стойкость. В соответствие с ней в поверхностном слое облучённого материала образуется барьер из атомов инертного газа, снижающий скорость сорбции химически активных газов из жидкой среды поверхностью металла. Подробно это исследование описано в работах [49, 81].

### 5.1.1. Постановка эксперимента

Исследуемые образцы представляли собой холоднодеформированные пластины (на  $\sim 30\%$ ) с размерами 20 x 10 x 2 мм. Образцы отжигались при температуре 1000°C в течение 1 часа с последующей полировкой в реактиве 20%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 80% этилового спирта.

Судя по составу всех сплавов можно сказать, что наибольшее число примесей находится в сплаве V – Ti – Cr ( $\approx 10\%$ ). Несмотря на то, что этот сплав является самым исследованным и апробированным, данный факт является недостатком по сравнению с другими рассмотренными сплавами, так как увеличение числа примесей влечёт за собой увеличение числа трансмутантов и, как следствие, увеличение активности сплава и увеличения периода её спада. Также по прочности сплав V – Ga – Si находится наравне со сплавом V – Ti – Cr. Эти соображения являются причиной исследования коррозионной стойкости всех трёх сплавов.

Образцы сплавов облучали с двух сторон в ускорителе ИЛУ [48] ионами аргона с энергией 20 кэВ до дозы  $10^{22} \text{ м}^{-2}$  при плотности потока ионов  $6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Температура мишеней в процессе облучения составляла  $\sim 400^\circ\text{C}$ .

Испытания на коррозионную стойкость проводили в статических изотермических условиях в ампулах из сплава V – 9 Cr, которые заправляли

литием марки ЛЭ-1 с исходным содержанием примесей азота, кислорода и углерода на уровне 0,02 – 0,03 масс. % с последующей герметизацией сваркой в атмосфере аргона. Ампулы помещали в защитные контейнеры из нержавеющей стали, которые герметизировали сваркой в атмосфере аргона и помещали в печь.

Эксперимент проводился методом «переворота» ампулы (Рисунок 2.3) [52]. Сначала ампулы с образцами выдерживали в позиции 1 при температуре 800°C в течение 40 ч. В таком положении образцы находились в атмосфере аргона, литий же контактировал с геттером (циркониевая трубка). В результате этого этапа содержание неметаллических примесей (в первую очередь азота и углерода) в литии уменьшалось до уровня  $< 1 \cdot 10^{-3}$  масс. %. Второй этап предполагал переворот ампулы и её выдержку при температуре 600°C в течение 400 часов. В таком положении образцы погружались в литий, очищенный от примесей в ходе первого этапа.

После вскрытия ампул измерялись твёрдость и масса образцов. Полученные данные сравнивались с показателями образцов до эксперимента. Твёрдость определялась двумя методами: методом Виккерса и методом кинетической твёрдости (непрерывного индентирования). В первом случае измерялась микротвёрдость ( $H_\mu$ ) на приборе 401/402 MVD, во втором — на приборе Nanotest

Топография поверхности образцов исследовалась до и после выдержки в литии на оптическом металлографическом микроскопе Neophot и в сканирующем электронном микроскопе JSM-35CF. Взвешивание образцов проводилось на аналитических лабораторных весах ВЛР-200, точность измерения на которых составляет  $5 \cdot 10^{-5}$  г.

### 5.1.2. Результаты эксперимента

Результаты экспериментов сведены в Таблицу 14.

Таблица 14.

Результаты экспериментов

Исследуемый материал		Скорость изменения массы, мг/(м <sup>2</sup> ·ч)		Микротвёрдость, МПа/мм <sup>2</sup>	
		Необлуч.	Облуч.	Необлуч.	Облуч.
V	до	-	-	1010	4530
	после	-7	-6	770	1040
V – 1,86 Ga	до	-	-	1230	3860
	после	+4	-16	1130	1200
V – 3,4 Ga – 0,62 Si	до	-	-	1860	3820
	после	-12,5	-9,5	1580	1770
V – 4,81 Ti – 4,82 Cr	До	-	-	1730	4500
	после	-11	-10,5	1810	1690

Как видно из Таблицы 14 в подавляющем большинстве случаев скорость убыли массы образцов варьируется от 6 до 16 мг/(м<sup>2</sup>·ч), что свидетельствует о незначительном растворении материалов в литии [78, 82]. Исключением стоит необлучённый образец сплава V – 1,86Ga, который незначительно набрал массу. Анализ изменения микротвёрдости образцов выявил интересную закономерность — микротвёрдость всех облучённых образцов до испытаний выше в 3 – 4 раза микротвёрдости необлучённых, и после испытаний она падает до исходных значений. Данный факт можно объяснить тем, что завышенная микротвёрдость обуславливается наличием радиационных дефектов, появляющихся вследствие действия пучков ионов аргона. В процессе очистки лития от примесей с помощью геттера (выдержка ампулы при температуре 800°C) происходит отжиг радиационных дефектов и, соответственно, снижение микротвёрдости. Для всех необлучённых образцов кроме сплава V – Ti – Cr характерно незначительное падение микротвёрдости поверхности. Увеличение



этого параметра для сплава V – Ti – Cr можно связать с образованием на поверхности образца упрочнённого слоя нитрида титана, как это наблюдалось в ранних экспериментах [78].

Анализ полученных результатов проводился на основе работ [78, 82 – 84]. В соответствии с этими источниками в ходе экспериментов имели место следующие процессы:

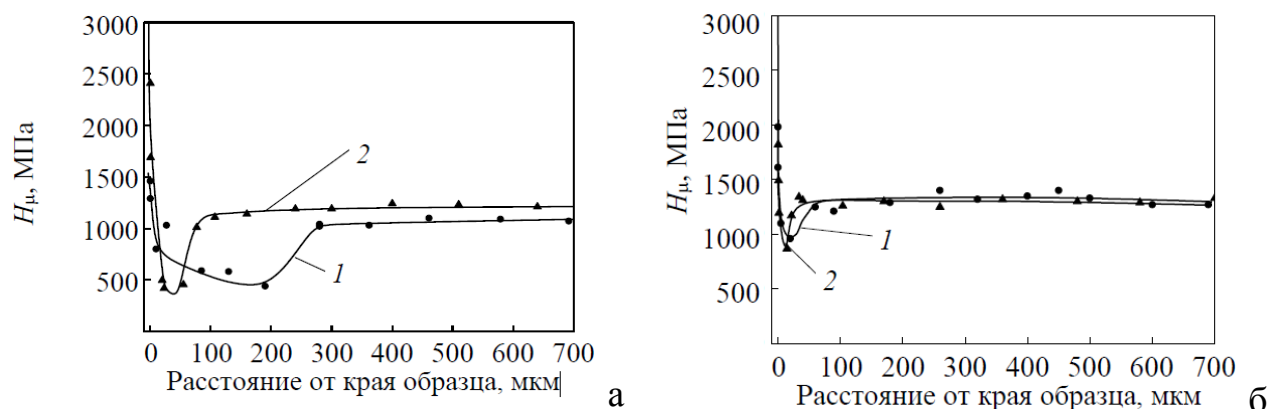
- 1) поглощение сплавами из лития примеси азота и углерода;
- 2) поглощение литием примеси кислорода из сплавов;
- 3) растворения компонентов сплава в жидком литии.

Так как растворимость компонентов сплавов в жидком литии пренебрежимо мала, то преобладающее значение имеет обмен неметаллическими примесями между сплавами и жидким литием. Из [78] следует, что увеличение микротвёрдости образцов после выдержки их в литии обусловлено насыщением поверхности примесью азота (насыщение поверхности углеродом идёт в 6 раз медленнее, чем азотом [78]). Наряду с этим процессом идёт диффузия кислорода из сплавов в литий, причём её интенсивность намного выше интенсивности насыщения поверхности азотом. Таким образом, интегрально преобладает процесс диффузии кислорода в литий из сплавов, что приводит к уменьшению общей твёрдости и общей массы образцов.

Подробную картину происходящих процессов показал анализ распределения микротвёрдости по поперечному сечению (Рисунок 5.1). Распределение строилось с помощью метода Виккерса, однако обнаружилось искажение отпечатков индентора в приповерхностных зонах образцов (Рисунок 5.2), поэтому исследование приповерхностных зон (глубиной до 20 мкм) проводилось с помощью прибора Nanotest (Рисунок 5.3). В распределениях твёрдости по глубине, представленных на Рисунке 5.1, для первых трёх точек были использованы значения  $H_{\mu}$ , полученные на приборе Nanotest. Из Рисунков 5.1 и 5.3 видно, что микротвёрдость всех сплавов в приповерхностных слоях

(порядка нескольких микрон) имеет завышенное значение, что связано с насыщением этих слоёв азотом и углеродом, более глубокие слои (10...100 мкм) имеют пониженную микротвёрдость вследствие обеднения атомами кислорода, причём этот «провал» наиболее выражен у облучённых образцов. Это можно объяснить более интенсивным уходом кислорода из приповерхностных слоёв из-за повышенного коэффициента диффузии примесных атомов в зоне высокой концентрации радиационно стимулированных дефектов структуры, не до конца отождённых при термообработке.

На Рисунке 5.4 показана топография поверхности образцов до и после испытаний в жидком литии. Видны следы коррозионного воздействия лития, выражающиеся в проявлении границ зёрен. Процессы, вызывающие этот эффект, должны быть предметом отдельного исследования, так как однозначного объяснения дать им в настоящее время не представляется возможным. Может быть, это связано с коррозионным растворением границ и других структурных элементов при том, что фронтального растворения практически не наблюдается — потери веса очень малы. Примеси внедрения концентрируются у дефектов, что может приводить к более интенсивному растворению этих зон в литии.



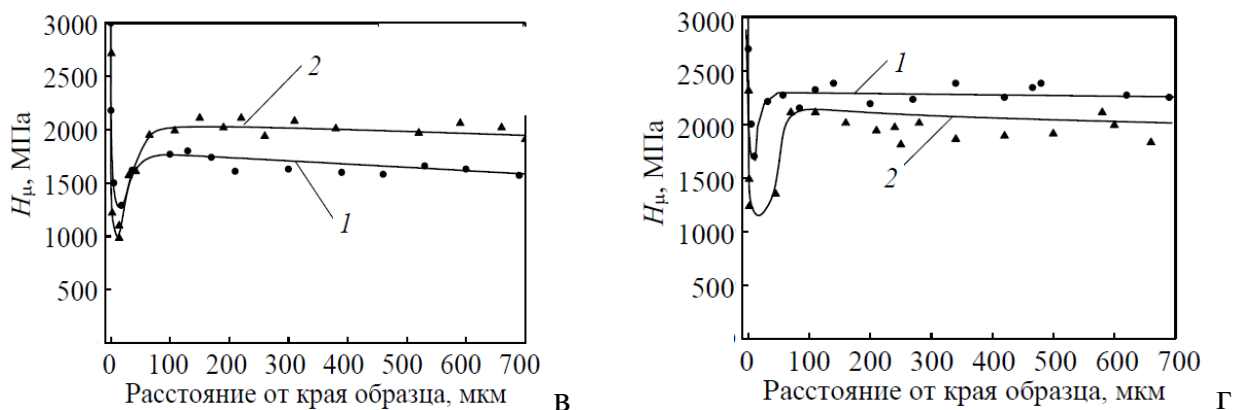


Рисунок 5.1. Распределение микротвёрдости по поперечному сечению исследуемых образцов после выдержки в Li (600°C, 400 ч): V (а); V – 1,86Ga (б); V – 3,4Ga – 0,62Si (в); V – 5Ti – 5Cr (г); 1 – необлучённые; 2 – облучённые

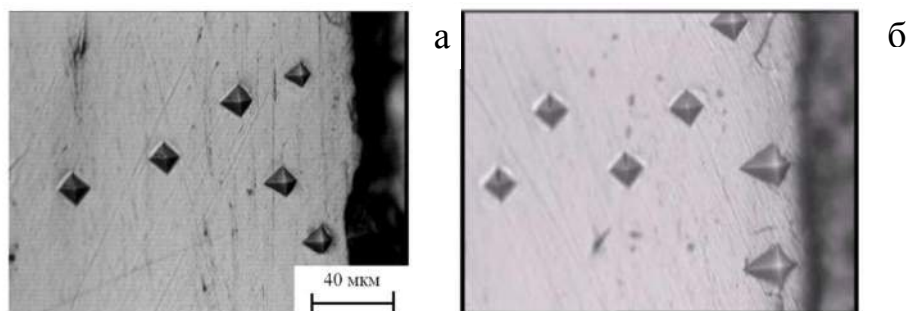


Рисунок 5.2. Формы отпечатков от индентора в приповерхностной зоне образцов V – 5Ti – 5Cr, необлучённого (а), V – 3,4Ga – 0,62Si, облучённого аргоном (б), после испытаний в Li (600°C, 400 ч)

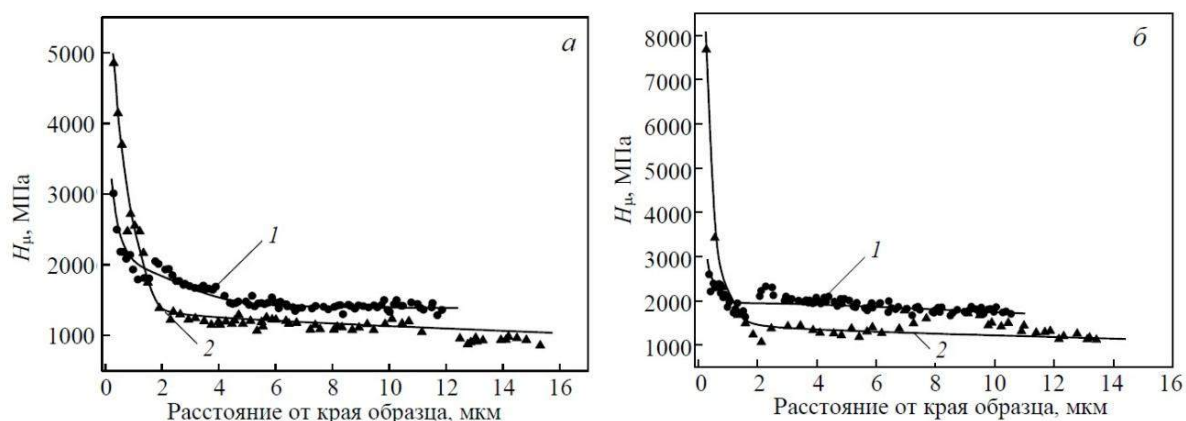


Рисунок 5.3. Распределение кинетической твёрдости по глубине поверхностного слоя сплавов V – 3,4Ga – 0,62Si (а), V – 5Ti – 5Cr (б) после выдержки в Li (600°C, 400 ч): 1 – необлучённые; 2 – облучённые аргоном

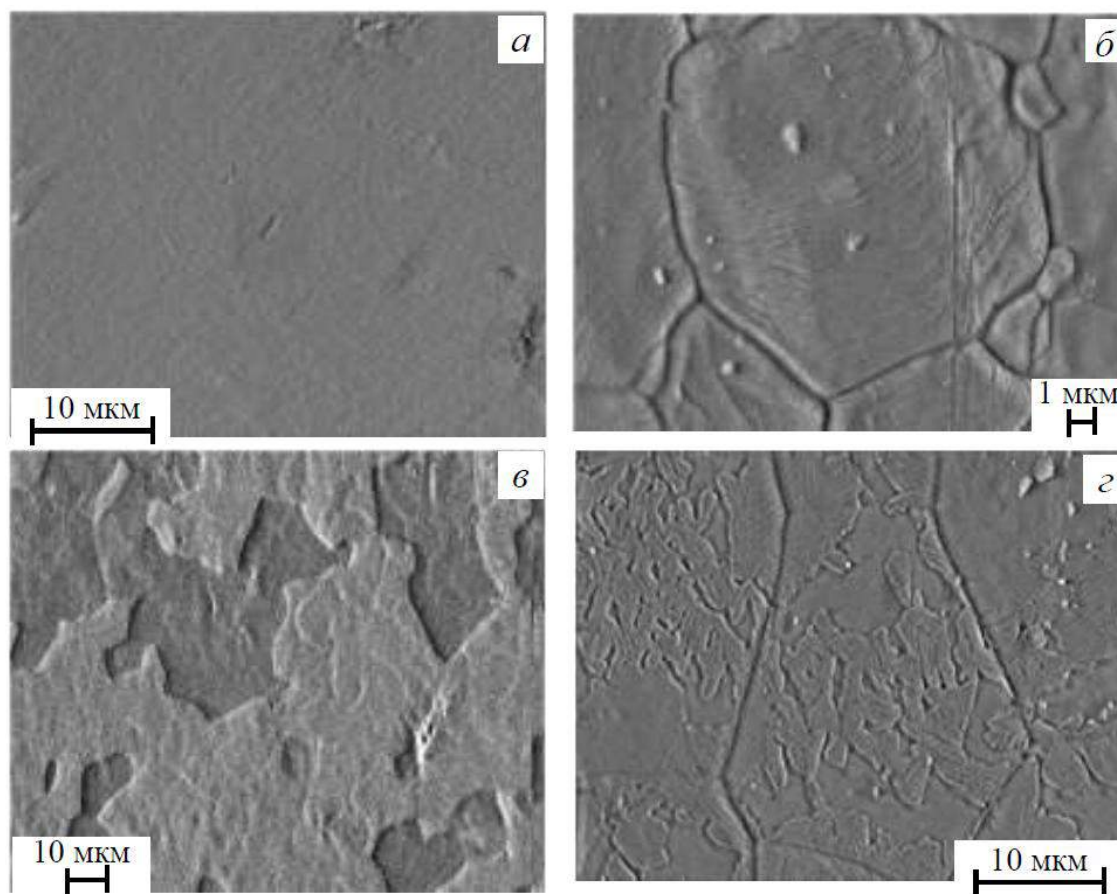


Рисунок 5.4. Топографии поверхности необлучённых (а, б) и предварительно облучённых аргоном (в, г) материалов до (а, в) и после (б, г) выдержки в Li при температуре 600°C в течение 400 ч

Резюмируя результаты проведённого исследования, можно сделать следующие выводы:

1) превалирующим процессом, происходящим при взаимодействии исследуемых материалов с жидким литием высокой чистоты, является диффузия атомов кислорода из приповерхностных слоёв образцов (от 10 до 100 мкм) в жидкий литий, что выражается в понижении твёрдости образца в этой зоне;

2) поглощение азота и углерода ванадиевыми сплавами из лития высокой чистоты достаточно мало, поэтому на их поверхности не образуется сплошной

защитной оксинитридной плёнки, хотя эффект увеличения микротвёрдости в приповерхностных слоях (до 10 мкм) присутствует;

3) механизмы коррозии для облучённых и необлучённых образцов идентичны. Различие составляет лишь интенсивность диффузии атомов кислорода;

4) обнаружено, что при  $T = 800^{\circ}\text{C}$  происходит отжиг радиационных дефектов, возникающих в ванадии и его сплавах при облучении ионами аргона с энергией 20 кэВ дозой  $10^{22} \text{ м}^{-2}$  при температуре  $\sim 400^{\circ}\text{C}$ ;

5) коррозионное воздействие лития на морфологию поверхности исследуемых материалов выражается в проявлении границ зёрен, что связывается с коррозионным растворением границ и других структурных элементов при том, что фронтального растворения практически не наблюдается.

## **5.2. Исследование коррозионного взаимодействия ванадия и ванадиевого сплава V–4Ti–4Cr с эвтектическим расплавом Na-K**

Развитие внутрикамерных литиевых элементов неизбежно ведёт к созданию стационарных устройств с активным охлаждением. На данный момент уже существует и проходит испытания модуль литиевого дивертора токамака КТМ с активным охлаждением эвтектическим расплавом 22,8 % Na – 77,2 % К [78, 79]. Охлаждающий тракт в нём выполнен из традиционной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. По изложенным выше причинам в термоядерных реакторах промышленного масштаба целесообразно использовать «малоактивируемые» ванадиевые сплавы, в частности, сплав V – 4Ti – 4Cr. Ранее проводились исследования коррозионной стойкости ванадия и его сплавов в натрии и калии [85 – 87]. В данном разделе диссертационной работы на основе работы [50] будет проведена экспериментальная оценка

коррозионной совместимости сплава V – 4 Ti – 4 Cr с эвтектическим расплавом 22,8 % Na – 77,2 % K.

### 5.2.1. Постановка эксперимента

Состав исходных образцов представлены в Таблице 15 (по паспорту образцы исследованных сплавов содержали примеси внедрения, масс. %: O — 0,01 – 0,02).

Таблица 15.

Химический состав исследуемого сплава V – 4 Ti – 4 Cr

Концентрация элемента, масс. %							
Ti	Cr	Al	Si	Fe	Nb	O	V
4,67	4,10	0,09	0,23	0,33	2,64	> 0,02	ост.

Образцы исследуемого сплава представляли собой цилиндры диаметром 16 мм, толщиной 1 мм и высотой 15 мм. Образцы нелегированного ванадия представляли собой пластинки с габаритами 10x10x1 мм. Испытания в среде жидкого металла проводили в ампулах  $\varnothing 20 \times 1$  мм высотой 60 мм, изготовленных из сплава V – 9 Cr с донышками из нелегированного листового ванадия, то есть практически в гомогенных условиях, как это и может быть реализовано в условиях реальной теплообменной системы. Заправку жидкого металла в ампулы проводили из заправочной емкости при комнатной температуре в герметичном боксе в среде высокочистого аргона, прошедшего дополнительную очистку геттерированием циркониевой стружкой при  $\sim 800^{\circ}\text{C}$ . В каждую ампулу заливали  $4,0 \pm 0,5$  г жидкого металла. Герметизацию ампул проводили аргонодуговой сваркой в атмосфере инертного газа. Схема эксперимента полностью копирует (за исключением вида жидкого металла) схему вышеописанных экспериментов с жидким литием (Рисунок 2.3).

Испытания проводились методом «переворота» ампулы [52]. Сначала заправленная ампула выдерживалась в течение 50 ч при температуре 800°C в позиции 1 (Рисунок 2.3). В таком положении образцы находились в атмосфере аргона, а жидкий металл контактировал с геттером (цирконий). В процессе этого этапа содержание кислорода в расплаве Na-K снижалось с  $5 \cdot 10^{-3}$  масс. % до  $1 \cdot 10^{-3}$  масс. %. Затем ампула переворачивалась и выдерживалась в таком положении при температурах 800°C и 600°C соответственно 500 и 200 часов. При этом очищенный от металлических примесей жидкий металл контактировал с образцами. После коррозионных испытаний образцы извлекались в инертной атмосфере из жидкого металла, остатки которого удалялись с их поверхности водяным паром и последующей промывкой в этиловом спирте.

Наряду с испытаниями в жидком металле проводились испытания образцов в атмосфере чистого аргона, дополнительно прошедшему процедуру очистки геттером в течение термической выдержки.

Образцы до и после испытаний взвешивались на аналитических лабораторных весах ВЛР-200, точность измерения на которых составляет  $5 \cdot 10^{-5}$  г. Микротвёрдость измерялась методом Виккерса на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор  $P = 50$  г. Как и в предыдущих экспериментах, во избежание завала кромок образцы помещались в латунное кольцо и заливались сплавом Вуда. Топографию поверхности образцов исследовали в сканирующем электронном микроскопе JSM-35CF.

### 5.2.2. Результаты эксперимента

Результаты гравиметрического исследования представлены в Таблице 16. Незначительное уменьшение массы образца из чистого ванадия может объясняться растворением компонентов материала, их концентрационным переносом через жидкую фазу между образцами различного химического

состава (V, V – 9 Cr, V – 4 Ti – 4 Cr), перераспределением примеси кислорода в исследуемой системе. Увеличение массы образцов из сплава V – 4Ti – 4Cr может говорить о повышенной геттерной способности сплава по отношению к кислороду по сравнению с нелегированным ванадием и материалом ампулы V – 9Cr, и, соответственно, о насыщении им поверхностных слоёв.

Таблица 16.

Результаты гравиметрического исследования образцов

Исследуемый материал	Изменение массы, $\Delta M$ , мг/см <sup>2</sup>	
	T = 800°C, t = 500 ч	T = 600°C, t = 200 ч
V	-0,2	-0,1
V – 4Ti – 4Cr	+0,6	+0,4

На Рисунке 5.5 показана топография поверхности сплава до и после испытаний. Видно, что рельеф поверхности в ходе исследования изменился незначительно. Профили микротвёрдости по поперечному сечению образцов до и после испытаний оказались почти идентичными.

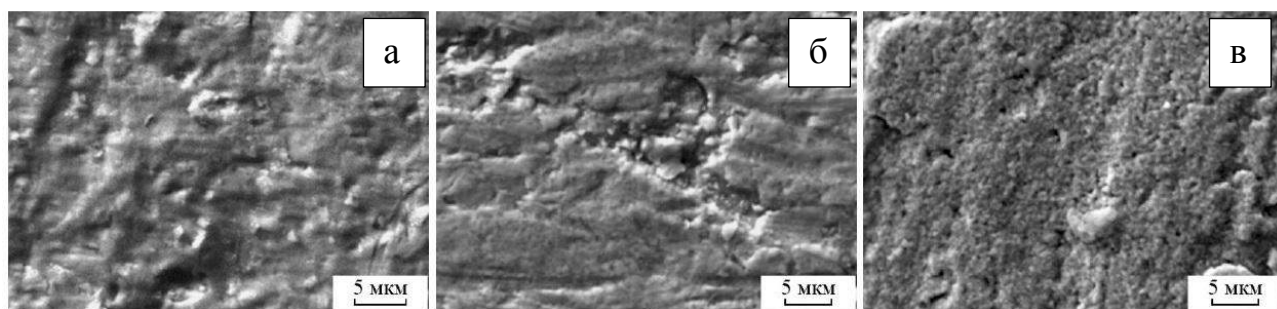


Рисунок 5.5. Топографии поверхности образцов сплава V – 4Ti – 4 Cr: а – до испытаний, б – после испытаний в среде аргона при T=800°C в течение 500 ч, в – после испытаний в среде Na-K эвтектики при T=800°C в течение 500 ч

Незначительное изменение характеристик образцов (микротвёрдости, массы, рельефа поверхности) после испытаний говорит о высокой



коррозионной стойкости сплава  $V - 4 Ti - 4Cr$  в расплаве  $Na-K$  эвтектического состава. Однако такой результат может быть следствием малого содержания кислорода в жидком расплаве. Следующим этапом в исследовании совместимости ванадиевых сплавов с эвтектикой  $Na-K$  должны быть испытания в конвективном потоке жидкого расплава при неизотермических условиях с повышенным содержанием кислорода.

### **5.3. Исследование коррозионной стойкости сплава $V - 4 Ti - 4 Cr$ в конвекционном потоке эвтектического сплава $Na - K$**

Цель исследования — исследование коррозионной стойкости сплава  $V - 4 Ti - 4 Cr$  в жидком расплаве  $Na-K$  — эвтектики в условиях неизотермического потока с повышенным содержанием примеси кислорода. Подробно это исследование описано в работе [51].

#### **5.3.1. Постановка эксперимента**

Экспериментальные образцы представляли собой цилиндры из ванадиевого сплава  $V - 4Ti - 4Cr$  диаметром 16 мм, толщиной 1 мм и высотой 3 мм (труба  $\varnothing 16 \times 1$ ). Ампула для испытаний изготавливалась из того же сплава и представляла собой трубу диаметром 50 мм, толщиной 3 мм и длиной 300 мм (труба  $\varnothing 50 \times 3$ ). Химический состав материала образцов и ампулы ( $\varnothing 50 \times 3$ ) представлен в Таблице 17.

Схема эксперимента показана на Рисунках 2.4 и 5.6. Фотографии ампулы показаны на Рисунке 5.7. Исследуемые образцы (13 штук) крепятся на планке из сплава  $V - 4Ti - 4Cr$ . Ампула помещается в защитный чехол из нержавеющей стали. К крышке чехла крепится планка с образцами, также через неё проходят заправочные и откачные трубы. На нижнюю часть ампулы наматывается проволоочный нагреватель. Заправка ампулы проводилась при

комнатной температуре через заправочный трубопровод в атмосфере аргона. Объем расплава — 280 мл. Контроль заправки осуществлялся с помощью уровнемера. При заправке из ёмкости-хранилища жидкий металл пропусклся через фильтр из нержавеющей стали с радиусом пор  $\sim 30$  мкм. После заправки вспомогательный трубопровод заваривался в атмосфере защитного газа. В ходе эксперимента было обеспечено воздушное охлаждение верхней части ампулы. Проведенный анализ заправляемого жидкого металла методом вакуумной дистилляции на наличие кислорода, показал, что он содержал 0,040 % кислорода. Эта величина превышает равновесную концентрацию кислорода в эвтектике Na – K при 20°C, что свидетельствует о наличии в ней мелкодисперсной фракции соединений натрия и калия с кислородом, которая не отделялась фильтрацией. Температура при испытании у дна ампулы составляла 640 – 650°C, у поверхности жидкого металла — 490 – 500°C, длительность испытаний — 500 ч. На Рисунке 5.8 показаны результаты расчёта скорости конвекционного потока эвтектики Na-K, выполненного в среде CosmosFloWorks численными методами. Видно, что максимальная скорость потока составляет 5 см/с. Извлечение образцов из эвтектики проводилось в атмосфере инертного газа.

Таблица 17.

Химический состав материала образцов и ампулы

Изделие (труба)	Содержание элементов, масс. %								
	Ti	Cr	Al	Fe	Si	Nb	O	C	N
Ø 16 × 1	4,67	4,10	0,09	0,33	0,23	2,64	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Ø 50 × 3	4,50	4,21	0,005	0,008	0,02	0,1	< 0,02	< 0,02	< 0,02

Образцы были исследованы стандартными методами гравиметрии (аналитические весы АДВ-200), микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе ZEISS EVO 50XV с приставкой INCA X-

аст, рентгеновского фазового анализа на дифрактометре ДРОН-7 и путем измерения микротвердости на твердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор 50 г.

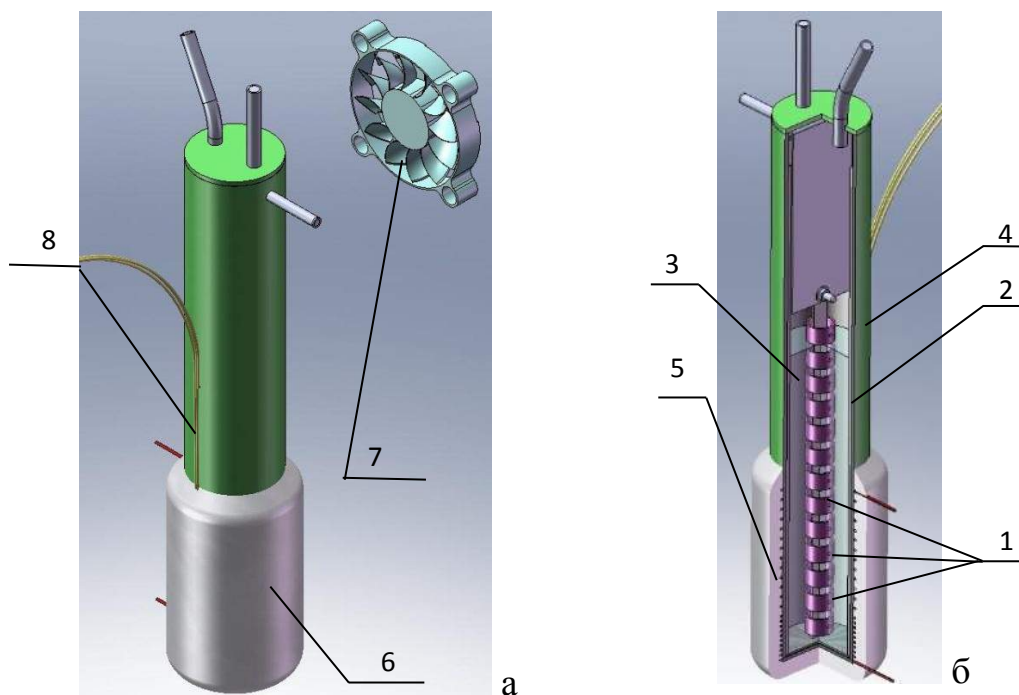


Рисунок 5.6. Схема эксперимента: а – общий вид, б – ампула в разрезе. На рисунке: 1 – образцы, 2 – ванадиевая ампула, 3 – раствор эвтектики Na-K, 4 – защитный стальной чехол, 5 – электрический нагреватель, 6 – термоизоляция, 7 – вентилятор, 8 – термопары

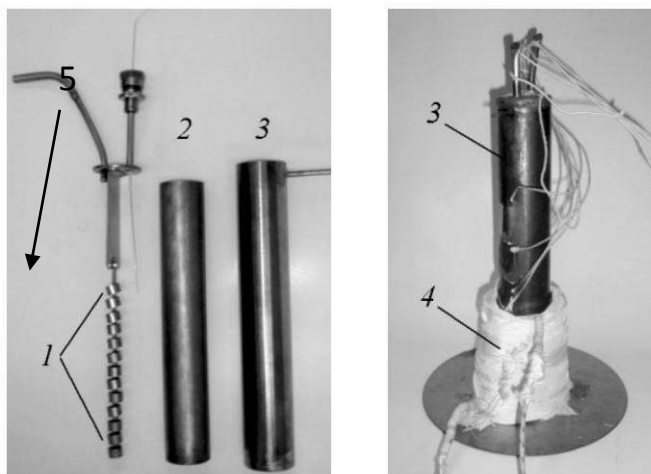


Рисунок 5.7. Фотографии экспериментальной ампулы: 1 – образцы, 2 – ванадиевая ампула, 3 – защитный стальной чехол, 4 – нагреватель, 5 – уровнемер

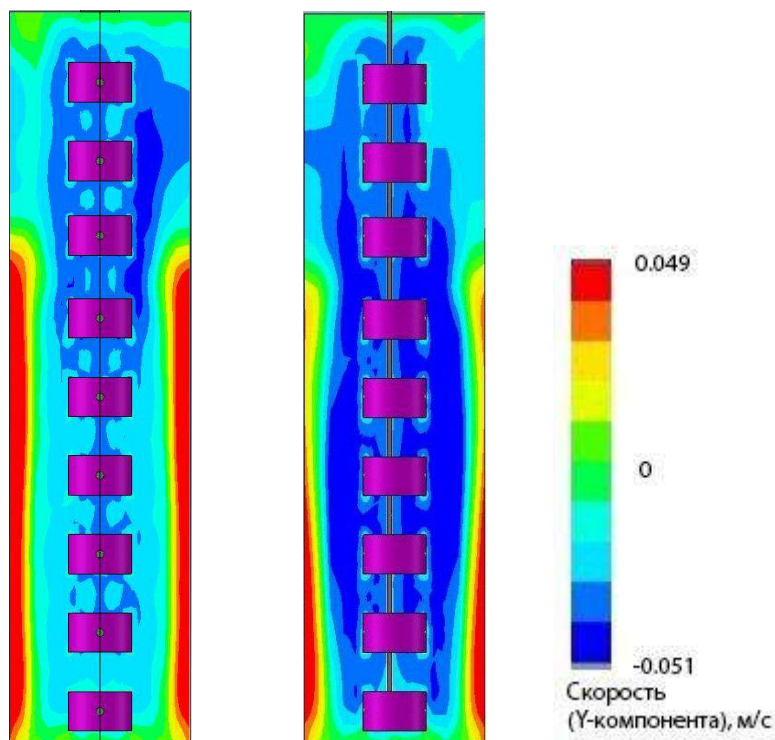


Рисунок 5.8. Результаты расчёта скорости потока Na-K эвтектики в двух взаимно перпендикулярных плоскостях

### 5.3.2. Результаты эксперимента

После вскрытия ампулы измерялся вес образцов с целью получения зависимости изменения массы образца от температуры (которая измерялась термопарами). Измеренное изменение массы переводилось в скорость изменения массы (растворения). Полученная зависимость показана на Рисунке 5.9 (по расчётной оценке, температура образцов могла отличаться на 3 – 4°, отрицательные значения скорости соответствуют приросту массы образцов). Как видно, имеет место приемлемый уровень коррозии и этот процесс резко интенсифицируется с ростом температуры.

На Рисунке 5.10 показано распределение титана, хрома и кислорода по глубине образца для двух температур: 520°C и 640°C, полученное с помощью локального микрорентгеноспектрального анализа. Из Рисунка 5.10 следует, что

приповерхностная зона глубиной до 10 мкм насыщена кислородом (концентрация — 6...10 масс. %).

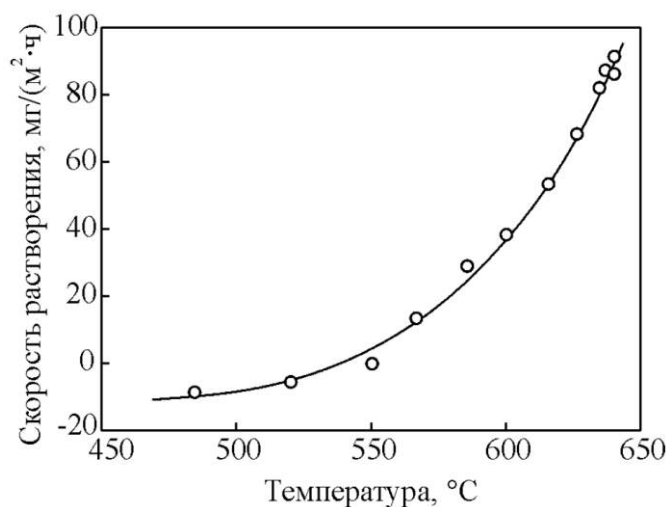


Рисунок 5.9. Зависимость скорости растворения образца от температуры

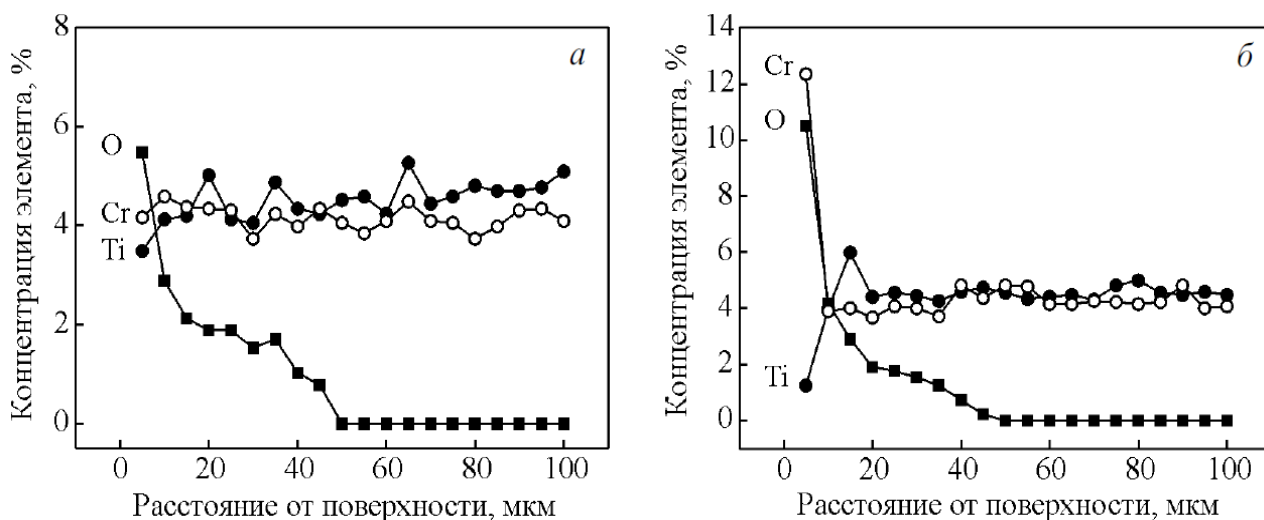


Рисунок 5.10. Распределение титана, хрома и кислорода по глубине образца после испытаний в Na-K эвтектики при температурах: 520°C (а) и 640°C (б)

Проведенный рентгеновский фазовый анализ поверхности образцов показал, что и при максимальной и при минимальной температурах испытания на поверхности фиксируются оксиды ванадия  $\text{VO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$ . Оксидных фаз, содержащих хром, которым обогащена поверхность образца, испытанного при

минимальной температуре, в пределах чувствительности метода не зафиксировано.

В профилях распределения кислорода по глубине образцов наблюдается плато с концентрацией кислорода 1,5 – 2,0 % (на глубине 10...50 мкм). Это соответствует тому, что в определенной подповерхностной зоне образцов соотношение (в атомных долях) титана и кислорода равно 1:1, что косвенно свидетельствует об образовании в материале оксида титана  $\text{TiO}_2$ , то есть протекает процесс внутреннего окисления, что видно на Рисунке 5.11. Такое явление наблюдали при исследовании совместимости сплавов системы V – Ti (до 20% Ti) с натрием [78, 88 – 90]. Эти данные согласуются с результатами измерения профиля микротвердости в образцах, испытанных в тех же условиях (Рисунок 5.12).

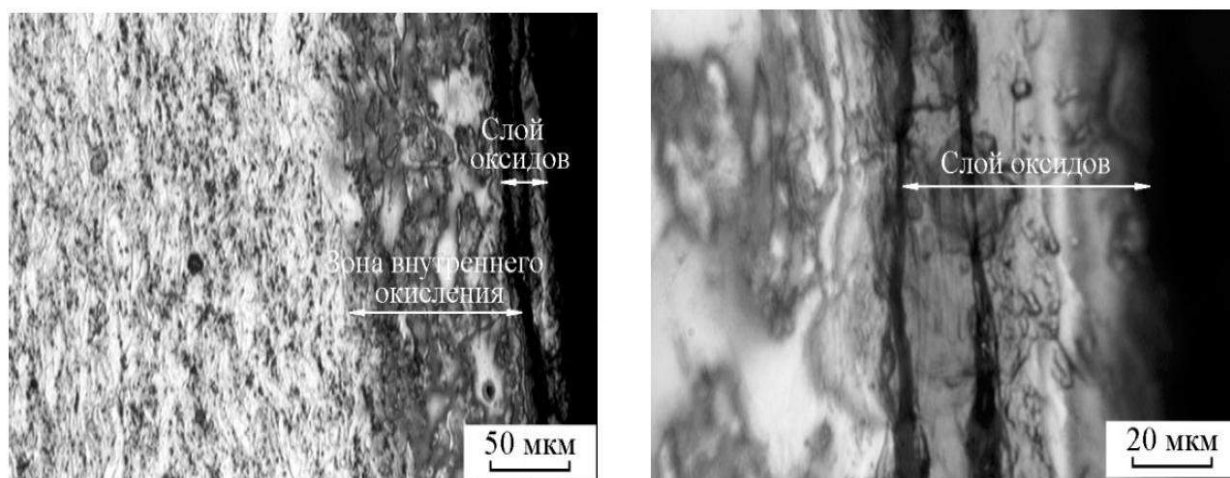


Рисунок 5.11. Микроструктура поперечного среза образца после испытаний в конвекционном потоке эвтектики Na – K при температуре 640°C (травитель HF, 1 ч;  $\text{HNO}_3$ , 1 ч;  $\text{H}_2\text{O}$ , 1 ч)

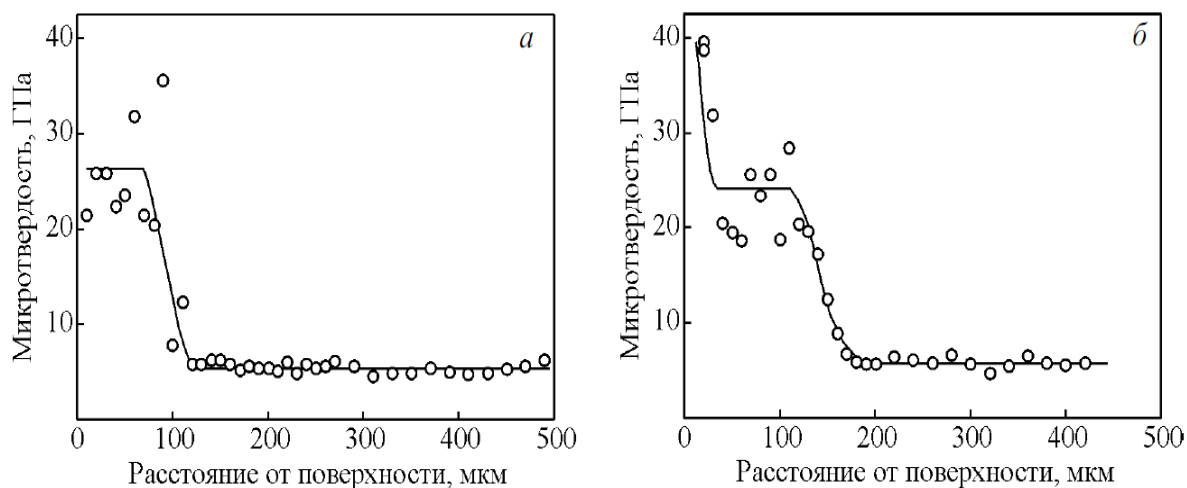


Рисунок 5.12. Распределение микротвердости по сечению образцов, прошедших испытания при температурах: 520°C (а) и 640°C (б), в конвекционном потоке эвтектики Na – K с исходным содержанием примеси кислорода  $4 \cdot 10^{-2}$  %

Проведённое исследование коррозионного взаимодействия сплава V – 4Ti – 4Cr с Na-K эвтектикой (с повышенным содержанием кислорода < 0.04 масс. %) показало следующие результаты:

1) экспериментально подтверждено предположение о сильном влиянии кислорода, растворённого в эвтектическом сплаве Na-K на процесс коррозии сплава V – 4Ti – 4Cr. Механизм коррозии связан с миграцией примесных атомов кислорода из жидкого расплава в сплав с последующим образованием оксидов ванадия и титана;

2) имеет место нелинейный рост скорости растворения сплава V-4Ti-4Cr с ростом температуры; в частности, при увеличении температуры от 600°C до 650°C скорость растворения сплава увеличивается в 2,5 раза (от 40 мг/(м<sup>2</sup>·ч) до 100 мг/(м<sup>2</sup>·ч)).

#### 5.4. Выводы по главе 5

Проведённые исследования показали хорошую совместимость ванадиевых сплавов с жидким литием и расплавом Na-K эвтектического состава. Выявлено, что превалирующим коррозионным процессом во всех рассмотренных случаях являлась диффузия неметаллических примесей (в первую очередь кислорода). Предварительное облучение ионами аргона не повлияло на коррозионную стойкость образцов (в основном из-за процесса отжига на первом этапе исследования), но повысило интенсивность диффузии атомов кислорода, что привело к незначительному понижению микротвёрдости образцов. Продemonстрировано прямое влияние температуры на коррозионные процессы: эксперименты с Na-K эвтектикой показали нелинейный рост скорости растворения сплава  $V - 4Ti - 4Cr$  с ростом температуры. Для снижения коррозионной активности рассматриваемых сред можно порекомендовать их очистку от неметаллических примесей (например, геттерированием) и оптимальный выбор 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.



## 6. Общие выводы и результаты работы

На основании проделанной в диссертационном исследовании научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы можно сделать следующие выводы.

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  $180^{\circ}\text{C}$  до  $550^{\circ}\text{C}$ , собирающей поверхности криогенной мишени лежит в области криогенных температур от  $-195^{\circ}\text{C}$  до  $-180^{\circ}\text{C}$ .

2. В опытах с кольцевым лимитером определено абсолютное количество собранного лития за экспериментальную кампанию в 1000 разрядов:  $100 \pm 10$  мг кольцевым лимитером и  $120 \pm 10$  мг боковыми стенками горизонтального рельсового лимитера, что соответствует расходу лития  $1,1$  мг/с. Дана оценка доле лития участвующего в процессе циркуляции ( $\approx 80\%$ ). 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  $\approx 10 \dots 100$  г/с (по оценке для токамака Т-11М). Выявлен двухэкспоненциальный характер распределения эмитированного лития в SOL токамака ( $\lambda_1 = 1$  см,  $\lambda_2 = 0,75$  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  $\lambda = 3,5$  см до  $\lambda = 2,5$  см при введении горизонтального лимитера в дополнение к вертикальному и до  $\lambda = 2,2$  см при понижении температуры вертикального лимитера с  $230^{\circ}\text{C}$  до  $60^{\circ}\text{C}$ . 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  $\lambda_1=1,5$  см,  $\lambda_2 = 3,7$  см). Уменьшение характерной длины спада потоков до  $\lambda_1=1$  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 преобладающим механизмом коррозионного процесса является диффузия кислорода из приповерхностных слоёв 10...100 мкм. Скорость убыли массы исследованных образцов, испытанных при 600°C в течение 400 ч, лежит в пределах от 6 до 16 мг/(м<sup>2</sup>·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°C до 650°C скорость растворения сплава увеличивается в 2,5 раза (от 40 мг/(м<sup>2</sup>·ч) до 100 мг/(м<sup>2</sup>·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 токамак-реактора с внутрикамерными элементами на основе литиевых капиллярно-пористых систем.

## Список использованной литературы

1. ITER Overview / Y. Shimomura [et al.] // [www.iaea.org](http://www.iaea.org): International Atomic Energy Agency. URL: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/csp\\_008c/fec1998/pdf/ov4\\_1.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/csp_008c/fec1998/pdf/ov4_1.pdf) (дата обращения: 10.09.2013).
2. Rebut P.-H. ITER: the first experimental fusion reactor // *Fusion Engineering and Design*. 1995. V. 27. P. 3-16.
3. Experimental modeling of plasma–graphite surface interaction in ITER / Yu. V. Martynenko [et al.] // *J. Nucl. Mater.* 1998. V. 258-263. P. 1120-1126.
4. Тамм И.Е. Теория магнитного термоядерного реактора // *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций*. Т. 1 / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Наука, 1958. С.3.
5. Сахаров А.Д. Теория магнитного термоядерного реактора // *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций*. Т. 1. / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Наука, 1958. С.21.
6. Sokolov Yu. A. Overview of the Russian DEMO plant study// *Fusion Engineering and Design*. 1995. V. 29. P. 18-27.
7. Ulrickson M.A. A review of plasma facing materials, past, present and future // *ICFRM-8: Program and collected abstracts*. Sendai. Japan. 1997. P. 128.
8. Akiba M., Madarame H. Effects of plasma disruption on structural and plasma-facing materials // *J. Nucl. Mater.* 1994. V. 212-215. P. 90-95.
9. Erosion lifetime of ITER divertor plates / Pacher H.D. [et al.] // *J. Nucl. Mater.* 1997. V. 241-243. P. 255-259.
10. Thermal shock behavior of various first-wall materials under simulation load tests by laser beam irradiation / A. Benz [et al.] // *J. Nucl. Mater.* 1994. V. 212-215. P. 1318-1322.
11. Material damage to beryllium, carbon, and tungsten under severe thermal shocks / J. Linke [et al.] // *J. Nucl. Mater.* 1998. V. 258-263. P. 634-639.
12. Liquid metal in fusion reactors with magnetic confinement/ V.G. Karasev [et al.] // *IAEA-TC-392.3/51*. 1987. P. 239-272.

13. Research and development of the liquid metal systems for a tokamak reactor / B.G. Karasev [et al.] // Fusion Engineering and Design. 1989. V. 8. P. 283-288.
14. Kirillov I.R., Muraviev E.V. Review of liquid metal divertor concepts for Tokamak reactor // Fusion Technology. 1997. P. 251-254.
15. Muraviev E. Liquid-metal-cooled divertor for ARIES // Fusion Engineering and Design. 1995. V. 29. P. 98-104.
16. Мирнов С.В., Евтихин В.А. Применение Ga и Li как материала лимитеров в токамаках Т-3М и Т-11М // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2005. Вып. 4. С. 3-18.
17. Experimental and calculated basis of the lithium capillary system as divertor material / N.V. Antonov [et. al.] // J. Nucl. Mater. 1997. V. 241-243. P. 1190-1196.
18. Design, calculation and experimental studies for liquid metal system main parameters in support of the liquid lithium fusion reactor / V.A. Evtikhin [et al.] // [www.iaea.org: 2440 pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp\\_001c/pdf/ftp\\_27.pdf](http://www.iaea.org:2440/pub/iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp_001c/pdf/ftp_27.pdf) (дата обращения: 16.10.2013).
19. Физико-химические основы использования лития в жидкометаллических системах термоядерного реактора / И.Е. Люблинский [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2007. Вып. 4. С. 13-44.
20. Reaserch of the capillary structures heat removal efficiency under divertor condition / V.A. Evtikhin [et al.] // J. Nucl. Mater. 1996. V. 233-237. P. 650-654.
21. Разработка жидкометаллического дивертора ТЯР с капиллярно-пористой системой / В.А.Евтихин [и др.] // Перспективные материалы. 1997. №1. С. 53-59.
22. Development and experimental study of lithium divertor with free liquid surface based on capillary structure / V.A. Evtikhin [et al.] // Proc. Of the First International Workshop on Liquid Metal Blanket Experimental Activities. Paris. 1997. P. 77.
23. Features of dynamics and structure of the shielding layer at the interaction of plasma flow with target / V.G. Belan [et al.] // J. Nucl. Mater. 1996. V. 233-237. P. 763-766.

24. Облучение литиевой капиллярно-пористой структуры стационарным электронным пучком большой мощности в магнитном поле / Н.В. Антонов [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 1997. Вып. 1-2. С. 34-42.
25. Experimental validation of the liquid lithium divertor concept / N.V. Antonov [et al.] // Fusion Technology. 1997. P. 243-246.
26. Lazarev V. B. [et al.] // Proc. of the 26th EPS Conf. on Contr. Fusion & Plasma Physics, 1999. V.23J. P. 845.
27. Behavior of high temperature liquid surfaces in contact with plasma / R.P. Doerner [et al.] // J. Nucl. Mater. V. 313-316. 2003. P. 383-387.
28. Measurements of erosion mechanisms from solid and liquid materials in PISCES-B / R.P. Doerner [et al.] // J. Nucl. Mater. V. 290-293. 2001. P. 166-172.
29. Plasma interaction with liquid lithium: Measurements of retention and erosion / M.J. Baldwin [et al.] // Fusion Engineering and Design. V. 61-62. 2002. P. 231-236.
30. Experimental Study on Tokamak Plasma Interaction with Lithium Capillary-Pore Systems / V.A. Evtikhin [et al.] // www.iaea.org: International Atomic Energy Agency. URL: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp\\_008c/pdf/exp4\\_21.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp_008c/pdf/exp4_21.pdf) (дата обращения: 16.10.2013).
31. Wall conditioning with impurity pellet injection on TFTR / J.A. Snipes [et al.] // J. Nucl. Mater. V. 196-198. 1992. P. 686-691.
32. Разработка концепции демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО/ Ю.А. Соколов [и др.]// ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 1997. Вып. 1, 2. С. 3-13.
33. First experiments with lithium limiter on FTU / M.L. Apicella [et al.]// J. Nucl. Mater. V. 363–365. 2007. P. 1346–1351.
34. Calculation and experimental investigation of fusion reactor divertor plate and first wall protection by capillary-pore systems with lithium / V.A. Evtikhin [et al.] // J. Nucl. Mater. V. 271-272. 1999. P. 396-400.
35. Effects of wall boron coating on FTU plasma operations / M.L. Apicella [et al.] // J. Nucl. Mater. V. 313-316. 2003. P. 269-273.

36. Experiments with lithium limiter on T-11M tokamak and applications of the lithium capillary-pore system in future fusion reactor devices / S.V. Mirnov [et al.] // Plasma Phys. Control. Fusion. V. 48. 2006. P. 821.
37. Fast ion Effects during Test Blanket Module Simulation Experiments in DIII-D / G.J. Kramer [et al.] // APS 52nd Annual Meeting DPP. Madison. USA, 2010. 55. № 15. XO4, 4. P. 375.
38. Mirnov S. Plasma-wall interactions and plasma behavior in fusion devices with liquid lithium plasma facing components // J. Nucl. Mater. 2009. V. 390-391. P. 876-885.
39. Li collection experiments on T-11M and T-10 in framework of Li closed loop concept / S.V. Mirnov [et al.] // Fusion Engineering and Design. V. 87. Issue 10. 2012. P. 1747-1754.
40. Li experiments on T-11M and T-10 in support of steady state tokamak concept with Li closed loop circulation / Mirnov S.V. [et al.] // [www.iaea.org](http://www.iaea.org): International Atomic Energy Agency. URL: [http://www-naweb.iaea.org/naweb/physics/fec/fec2010/papers/exd\\_p3-22.pdf](http://www-naweb.iaea.org/naweb/physics/fec/fec2010/papers/exd_p3-22.pdf) (дата обращения: 23.01.2014).
41. Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные реакции . 2-е изд. перераб. М.: Физматгиз. 1963. 496 с.
42. Recent lithium experiments in tokamak T-11M / S.V. Mirnov [et al.] // J. Nucl. Mater. V. 438. Supplement. 2013. P. S224–S228.
43. Прохоров А.С. Исследование влияния лития на характеристики плазмы в токамаке: дисс. ... канд. тех. наук. Москва. 2004. 127 с.
44. Lazarev V.B., Mirnov S.V. Experimental investigation of radial distributions of Li<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, D<sup>+</sup> in the SOL of T-11M tokamak with lithium limiter // 37th EPS Conf. on Plasma Phys. 2010. P2.141.
45. Lazarev V.B., Gorbunov Ya.V., Mirnov S.V. Investigation of the lithium distribution in the SOL in T-11M tokamak with lithium limiter // 35th EPS conf. Crete. Greece. 2008. P. 5.004.

46. Experiments at the T-11M device in substantiation of the tokamak with Lithium loop cycle / Azizov E.A. [et al.] // 36 EPS Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion. Sofia. 2009. P5.192.
47. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Объемный анализ. Весовой анализ. Понятие о физических и физико-химических методах анализа. Т.2. 3-е изд., перераб. М.: Химия. 1970. 456 с.
48. Ионный ускоритель ИЛУ на 100 кэВ с сепарацией по массе / В.М. Гусев [и др.] // ПТЭ. 1969. Т. 4. С. 19-25.
49. Исследование коррозионной стойкости ванадиевых сплавов в жидком литии / М.Ю. Жарков [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. Вып. 1. С. 15-21.
50. Совместимость ванадия и сплава  $V - 4 Ti - 4 Cr$  с расплавом натрий-калий эвтектического состава // М.Ю. Жарков [и др.] // Перспективные материалы. 2014. №7. С. 21-29.
51. 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.
52. Баландин Ю.Ф., Марков В.Г. Конструкционные материалы для установок с жидкометаллическими теплоносителями. Л.: Судпромгиз. 1961. 208 с.
53. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение. 2009. 312 с.
54. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determination hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. 1992. V. 7. № 6. P. 1564-1583.
55. Жарков М.Ю. Литиевые капиллярно-пористые системы для энергонагруженных компонент токамаков // Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, посвященная 50-летию МИЭМ: Внутривузовский сборник тезисов докладов участников. Москва. 2012. 440 с.



56. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т. Т.1 / Под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение. 1996. 992 с.
57. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т. Т.2 / Под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. 1024 с.
58. Klueh R.L., Tanaka M.P. Steels for fusion reactor applications // J. Metals. V. 10. 1985. P. 16-23.
59. Михеев М. А. Основы теплопередачи. 2-е изд. перераб. М.: госэнергоиздат. 1949. 396 с.
60. Wesson J. Tokamaks. Third edition. Oxford: Clarendon press. 2004. 749 p.
61. Исследование ELM активности в омическом H-режиме на токамаке Т-11М / В.Б. Лазарев [и др.] // [www.fpl.gpi.ru](http://www.fpl.gpi.ru): институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Отдел физики плазмы. URL: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXVI/magud.htm> (дата обращения: 04.03.2014).
62. 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.
63. Мирнов С.В. Физические процессы в плазме токамака. М.: Энергоатомиздат. 1983. С. 184.
64. Жарков М.Ю., Люблинский И.Е., Вертков А.В. Вертикальный литиевый лимитер для экспериментов на токамаке Т-11М // Радиационная физика твёрдого тела: труды XXII международной конференции. Севастополь. 2012 г. С. 316-323.
65. Progress in development and application of lithium based components for Tokamak / M.Yu. Zharkov [et al.]// Fusion Engineering and Design. V. 89. Issue 7-8. 2014. P. 996-1002.
66. Эксперименты с литиевой диафрагмой на токамаке Т-11М/ В.Б. Лазарев [и др.] // [www.fpl.gpi.ru](http://www.fpl.gpi.ru): институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Отдел физики плазмы. URL: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXVIII/MU/ru/u1/06-Lazarev.doc> (дата обращения: 17.03.2014).

67. Mirnov S.V. Experiments at the T-11M device in support of the tokamak concept with closed Li cycle // *Fusion Engineering and Design*. V. 85. Issue 6. 2010. P. 919-923.
68. Криогенная мишень для токамака Т-11М: назначение, конструкция, первые результаты экспериментов / М.Ю. Жарков [и др.]// *Радиационная физика твёрдого тела: труды XXIII международной конференции*. Севастополь. 2013 г. С. 289-295.
69. Изучение особенностей циркуляции лития вблизи литиевого лимитера Т-11М с использованием дополнительного кольцевого / В.Б. Лазарев [и др.] // *Взаимодействие плазмы с поверхностью: материалы XV конференции*. Москва. 2012. С. 48-54.
70. Экспериментальные исследования переноса лития в тени продольного и вертикального литиевых лимитеров на токамаке Т-11М / М.Ю. Жарков [и др.] // *Взаимодействие плазмы с поверхностью: материалы XVIII конференции*. Москва. 2015. С. 30-32.
71. Мирнов С.В. Эволюция концепции стационарного токамака // *Взаимодействие плазмы с поверхностью: материалы XVIII конференции*. Москва. 2015. С. 12-15.
72. Mirnov S.V., Lazarev V.B. Li experiments at the tokamak T-11 M in field of steady state PFC investigations // *J. Nucl. Mater.* V. 415. Issue 1. 2011. P. S417–S420.
73. Recent achievements of the T-11M lithium program / S. Mirnov [et al.] // *24th IAEA Fusion Energy Conference: Programme & Book of Abstracts*. San Diego. USA. 2012. P. 182.
74. Mirnov S. [et al.] // *Proc. of 20th International Conference on Plasma Surface Interaction*. Aachen. Germany. 2012. P. 104.
75. Tests of the cryogenic target for lithium and hydrogen isotopes extraction from the chamber of T-11M tokamak without its venting / Mikhail Yu. Zharkov [et al.]// *Fusion Engineering and Design*. V. 89. Issue 12. 2014. P. 2923-2929.

76. Исследование эффективности сбора лития криогенной мишенью на токамаке Т-11М / А.Н. Щербак [и др.] // Взаимодействие плазмы с поверхностью: материалы XVII конференции. Москва. 2014. С. 46-49.
77. Испытания криогенной мишени, предназначенной для удаления лития из токамака Т-11М / М.Ю. Жарков [и др.]// [www.fpl.gpi.ru](http://www.fpl.gpi.ru): институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН. Отдел физики плазмы. URL: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLI/Mu/ru/BG-Mirnov.docx> (дата обращения: 21.03.2015).
78. Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века / В.Н. Михайлов [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1999. 528 с.
79. Module of lithium divertor for KTM tokamak / M. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2012. V. 87. Issue 10. P. 1719-1723.
80. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor for KTM tokamak / Mikhail Yu. Zharkov [et al.]// Fusion Engineering and Design. 2013. V. 88. Issues 9-10. P. 1862-1865.
81. Коррозионная стойкость сплавов V-Ga и V-Ti-Cr в литии / М.Ю. Жарков [и др.] // Перспективные материалы. 2014. №5. С. 27-33.
82. Люблинский И.Е. Литий в энергетическом термоядерном реакторе // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2006. Вып. 6. С. 3-26.
83. Дедюрин А.И., Люблинский И.Е., Боровицкая И.В. Коррозионная стойкость в литии сплавов V—Ga // Металлы. 1998. № 3. С. 71-74.
84. Chopra O.K., Smith D.L. Corrosion behavior of vanadium alloys in flowing lithium // J. Nucl. Mater. 1988. V. 155-157. Part 2. P. 683-689.
85. Fuels and materials development program quarterly progress report for period ending December 31, 1968 / Compiled by P. Patriarca, Edited by D. J. Rucker // Report of Oak Ridge National Laboratory ORNL-4390. Oak Ridge. Tennessee. USA. May 1969. Alkali-Metal Corrosion Studies. P. 85-112.
86. Fuels and materials development program quarterly progress report for period ending September 30, 1968 / Compiled by P. Patriarca W. O. Harms. Edited by D. J.

Rucker // Report of Oak Ridge National Laboratory ORNL-4350. Oak Ridge. Tennessee. USA. February 1969. Alkali-Metal Corrosion Studies. P. 85-138.

87. Fuels and materials development program quarterly progress report for period ending June 30, 1968 / Compiled by P. Patriarca W. O. Harms. Edited by D. J.

Rucker // Report of Oak Ridge National Laboratory ORNL-4330. Oak Ridge. Tennessee. USA. November 1968. Alkali-Metal Corrosion Studies. P. 75-150.

88. Klueh R.L., DeVan J.H. Effect of oxygen in sodium on vanadium and vanadium alloys // J. of the Less-Common Metals. 1970. V. 22. Issue 4. P. 389-398.

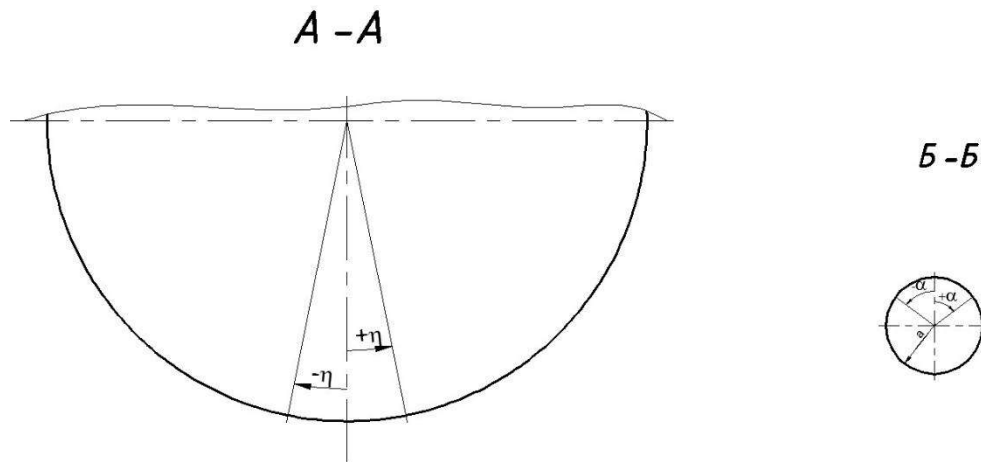
89. Effect of oxygen on V – Nb – Mo, V – Nb – Cr and V – Ti alloys in liquid sodium / T. Suzuki [et al.]// J. Nucl. Mater. 1976. V. 62. P. 205-212.

90. Borgstedt H.U., Frees G. Oxidation of metals and alloys for cladding of reactor fuel elements by oxygen-containing alloys in liquid sodium // J. Nucl. Mater. 1976. V. 62. P. 205–212.

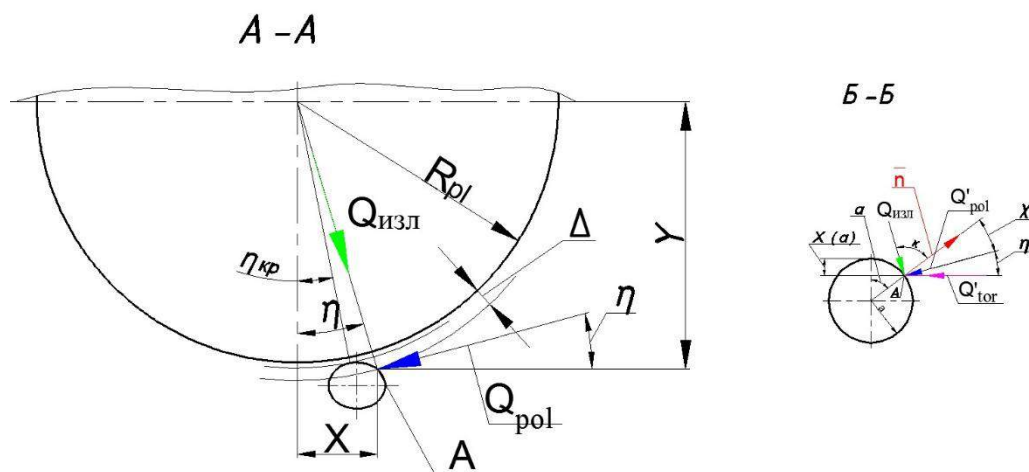
## Приложение

Расчётные схемы к системам уравнений (3.76) и (3.78)

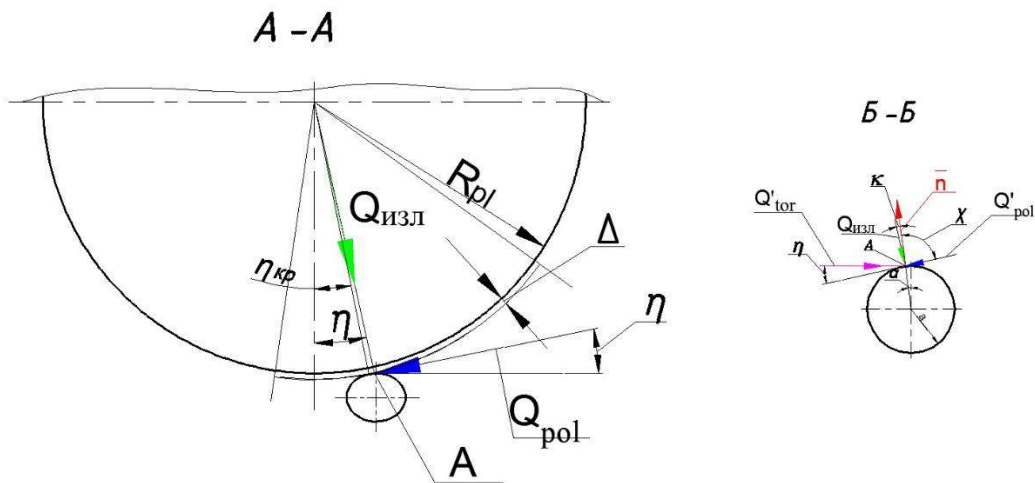
Направление отсчёта углов:



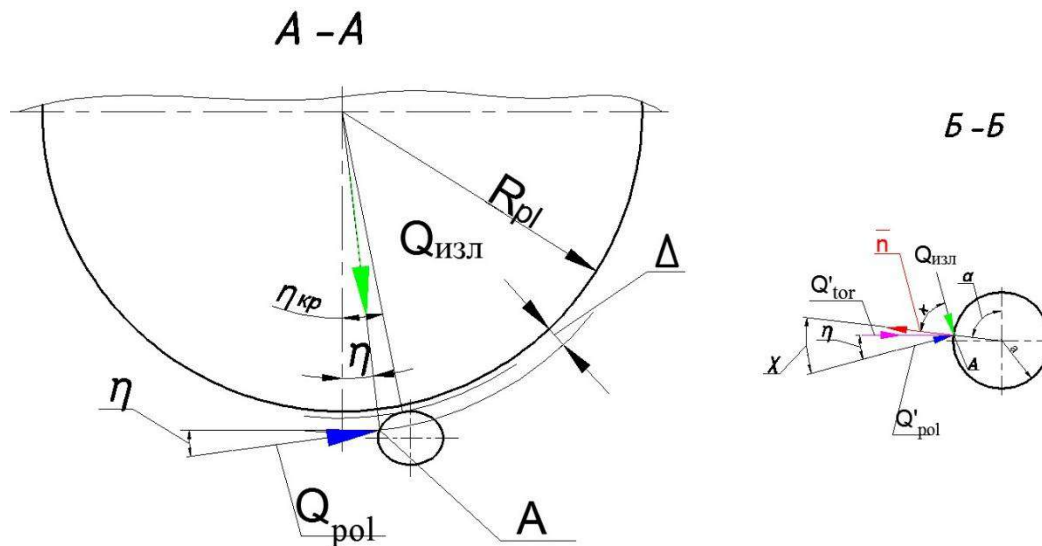
Расчётная схема к уравнениям №1 в системах уравнений (3.76) и (3.78):



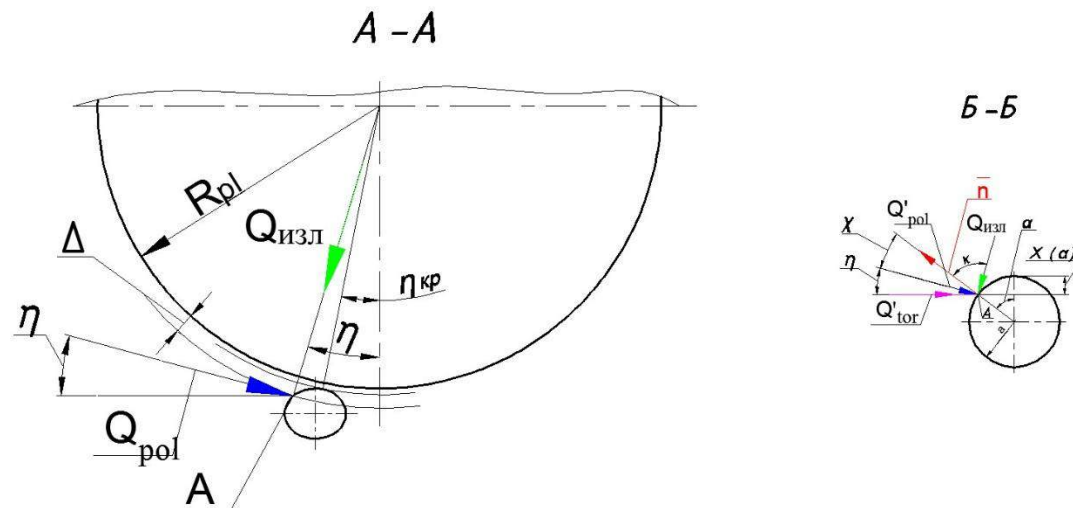
Расчётная схема к уравнениям №2 в системах уравнений (3.76) и (3.78):



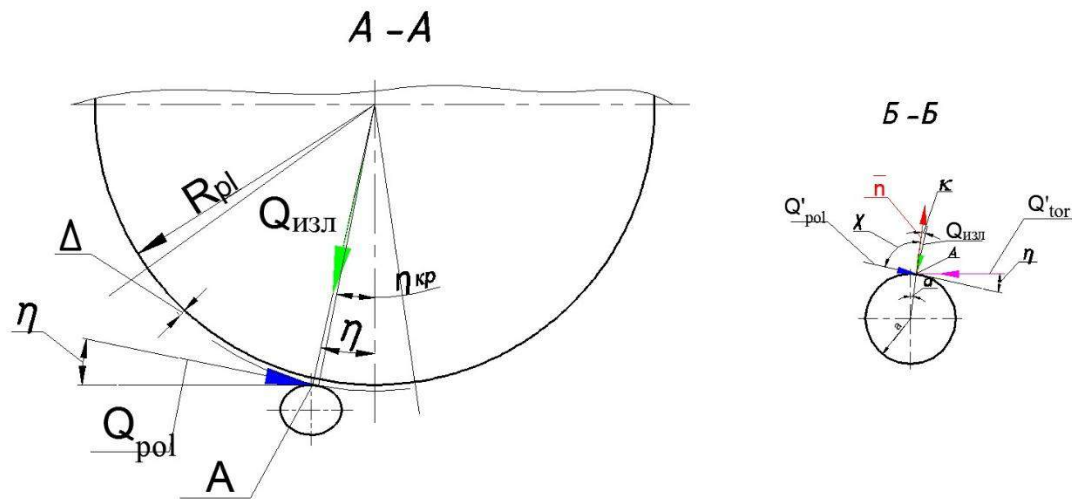
Расчётная схема к уравнениям №3 в системах уравнений (3.76) и (3.78):



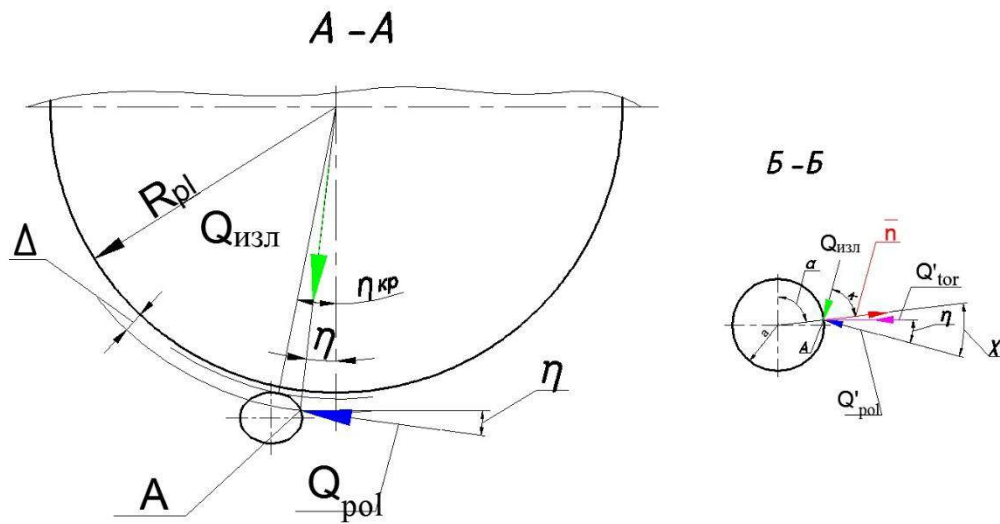
Расчётная схема к уравнениям №4 в системах уравнений (3.76) и (3.78):



Расчётная схема к уравнениям №5 в системах уравнений (3.76) и (3.78):



Расчётная схема к уравнениям №6 в системах уравнений (3.76) и (3.78):



Расчётная схема к уравнениям №7 в системах уравнений (3.76) и (3.78):

