

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

ВАСИНА ЯНА АНДРЕЕВНА

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИТИЕВОЙ ЭМИТТЕР-КОЛЛЕКТОРНОЙ
СИСТЕМЫ ТОКАМАКА**

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук



Москва 2022

Работа выполнена в акционерном обществе "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований"

Научный Мирнов Сергей Васильевич

руководитель:

д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель
отделения АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г. Москва, г.
Троицк

Официальные Вершков Владимир Александрович

оппоненты:

д.ф.-м.н., начальник лаборатории НИЦ
«Курчатовский институт», г. Москва

Тажигаева Ирина Лашкаровна

д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник,
исполнительный директор центра безопасности
ядерных технологий, председатель правления
Ядерного Общества РК, Институт Атомной
Энергии Национального Ядерного Центра РК, г.
Алматы

Федорович Сергей Дмитриевич

к.т.н. наук, доцент НИУ "МЭИ", г. Москва

Защита состоится «22» сентября 2022 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.04 НИЯУ МИФИ по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года

**Учёный секретарь
диссертационного совета**



к.ф.-м.н
Краснов В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность выбранной темы

Целью токамака-реактора ИТЭР (Интернационального Термоядерного Экспериментального Реактора) является демонстрация осуществимости термоядерной реакции промышленного масштаба. На протяжении последних 50 лет в разных странах мира ведутся целенаправленные работы по изучению свойств и особенностей поведения горячей плазмы в применении к проблемам таких стационарных (или квазистационарных) токамаков-реакторов. В частности, это касается первой стенки токамака-реактора и других элементов, обращенных к плазме.

Задача создания первой стенки токамака, обладающей эксплуатационным ресурсом, необходимым для его промышленного использования, остается одной из наиболее актуальных задач исследований в области УТС. Общеизвестно, что твердые материалы (тугоплавкие металлы, графиты, силикаты) подвержены активной эрозии при взаимодействии с агрессивной водородной плазмой, что требует их относительно частой замены.

Потенциально возможным решением в этой области может стать использование жидких металлов в качестве самовосстанавливающихся контактных поверхностей плазма-первая стенка (PFC-компонентов реактора, контактирующих с плазмой). Наиболее перспективным из них сегодня представляется литий. Внедрение литиевой технологии в УТС принимает в последние годы широкий характер. Ключевой задачей, которая решается при этом, является обеспечение эксплуатационного ресурса первой стенки и дивертора термоядерного реактора. Ее решением может стать создание самовосстанавливающегося литиевого покрытия внутренней стенки реактора, постоянно возобновляемого в ходе замкнутой циркуляции лития вблизи границы горячей плазмы между эмиттером лития и коллекторами, которые могли бы позволить собрать инжектированный в плазму литий и потом вернуть его обратно в эмиттер, предварительно

очистив (например, путем прогрева) от захваченных атомов водородных изотопов.

Создание подобного контура циркуляции лития вблизи границы плазмы предполагает последовательное решение трех технических задач: обеспечения эмиссии лития в плазму, его сбора до выхода на стенку камеры токамака и его возвращения в область эмиттера. Проблема инжекции лития в плазменный шнур была решена ранее [1], проблему сбора предстоит решать. Решению этого вопроса в условиях малого токамака Т-11М посвящена предлагаемая диссертационная работа, что определяет ее актуальность.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование поведения потоков лития (видимая асимметрия с ионной и электронной стороны) в пристеночной плазме токамака и определение её параметров; оптимизация коллекторной системы. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Измерить параметры пристеночной плазмы токамака Т-11М в четырех технически возможных схемах расположения эмиттеров и коллекторов лития (радиальный профиль потока ионов лития, скорость вращения шнура) с помощью зонда Маха;
2. Найти наиболее оптимальную схему расположения эмиттеров и коллекторов лития из технически возможных в условиях Т-11М;
3. Определить механизм образования магнитного острова в несимметричной системе эмиттеров и коллекторов;
4. Сравнить эффективности сбора лития на гладкий продольный коллектор и коллектор на основе капиллярно-пористой системы (КПС).

Методология и методы исследования

Измерение параметров пристеночной плазмы, а также скорости её вращения проводилось с помощью зонда Маха, установленного в камеру токамака Т-11М. Введение зонда на заданное расстояние в пристеночную плазму, а также вращение его на 180° от импульса к импульсу позволило получить радиальные и угловые распределения параметров плазмы. Эффективность сбора лития на коллектор исследовалась с помощью метода пламенного анализа, для чего использовался пламенный фотометр ПФА-378.

Научная новизна

В ходе проведения работы впервые было установлено, что из всех технически возможных эмиттер-коллекторных комбинаций Т-11М наиболее эффективной является комбинация литиевых коллекторов, симметричная по отношению к поверхности плазменного шнура.

Впервые экспериментально обнаружено образование магнитного острова, нарушающего циркуляцию лития при введении лимитера в пристеночную плазму токамака в несимметричной системе эмиттеров и коллекторов.

Впервые проведено сравнение эффективности сбора лития поверхностью гладкого коллектора и коллектора, покрытого различными слоями КПС-сетки.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Анизотропия видимого свечения с «ионной» и «электронной» сторон литиевых коллекторов вызвана макроскопическим движением плазменного шнура со скоростью, близкой к скорости звука для ионов Li^+ , направленным в сторону тока плазмы

2. Асимметрия в расположении литиевых коллекторов по отношению к границе плазменного шнура токамака инициирует в зоне его SOL повышенный перенос лития из шнура на стенку разрядной камеры;

3. Наблюдаемые «особенности» в распределении потоков лития и электронной температуры по малому радиусу r позволили предполагать возникновение магнитного острова, инициированного асимметрией коллекторов;

4. Асимметрия расположения коллекторов лития вызывает образование на их поверхностях локальных зон повышенного и пониженного энерговыделения – характерных признаков образования островной конфигурации (X и O – точки);

5. Снижение потока лития на стенку и увеличение эффективности его сбора может быть достигнуто путем симметризации лимитеров и коллекторов лития, как относительно границы плазменного шнура, так и вдоль тора через 180° , для подавления возможности образования X и O точек магнитных островов;

6. Использование для эффективного сбора лития КПС в виде многослойных сеточных покрытий литиевых коллекторов не менее чем с двумя слоями сетки.

Достоверность

Достоверность полученных научных результатов обусловлена тем, что они получены с применением диагностики, широко апробированной в лабораторной практике УТС: зонд Маха с жидкометаллическим вводом в разрядную камеру токамака, позволяющий пространственное перемещение зонда между рабочими импульсами, скоростные видеокамеры, оснащенные фильтрами спектральных линии лития и скоростные инфракрасные камеры, позволяющие определять поверхностную температуру литиевых лимитеров и зонда Маха в процессе разряда. Результаты работы были представлены на международных конференциях и опубликованы в реферируемых журналах.

Научная и практическая значимость работы

На основании полученных результатов для создания эмиттер-коллекторной комбинации контура циркуляции лития следует рекомендовать симметричную схему размещения как по

отношению к поверхности плазменного шнура, так и вдоль тороидального поля через 180° для уменьшения вероятности образования магнитных островов. Эта рекомендация может быть полезна при создании контура циркуляции лития токамака Т-15МД.

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на 8 научных российских и зарубежных конференциях:

На 5 и 6 Международном симпозиуме по применению жидких металлов в термоядерных установках (ISLA -5, ISLA -6), 25-27 сентября 2017 года, Москва; 30 сентября – 3 октября 2019 года, Иллинойс, США.

- XXII, XXIII, XXIV конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью», 23 - 24 января 2019 года, 23-24 января 2020 года, 4-5 февраля 2021 года, Москва.

- 46-ой Международной конференции Европейского физического общества по физике плазмы (EPS 2019), 8-12 июля 2019 года, Милан, Италия.

- XLVII и XLVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород Московской обл. 16 — 20 марта 2020 года, 15-19 марта 2021 года.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 3 статьи в журналах из списка ВАК РФ (все статьи входят в перечни баз данных Scopus и WebofScience). Основные публикации по теме диссертации:

1. Васина Я.А., Джурик А.С., Пришвицын А.С., Мирнов С.В., Лазарев В.Б. Оптимизация технологической системы замкнутого литиевого контура на токамаке Т-11М // ВАНТ Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т.43. вып.3. С. 47-59 (ВАК).
2. Щербак А.Н., Мирнов С.В., Джурик А.С., Лазарев В.Б., Васина Я.А., Отрощенко В.Г., Люблинский И.Е., Вертков

А.В., Жарков М.Ю. Экспериментальное исследование захвата Li, H и D литиевыми коллекторами в зависимости от температуры их поверхности на токамаке Т-11М. //Физика плазмы. 2018. Т.44. №11. С. 861-869 (БАК).

Shcherbak, A.N., Mirnov S.V., Dzhurik A.S., Lazarev V.B., Vasina Ya.A., Otroshchenko V.G., Luyblinski I.E., Vertkov, A.V., Zharkov, M.Y., Experiments on the Capture of Li, H, and D by Lithium Collectors at Different Surface Temperatures at the T-11M Tokamak, Plasma Physics Reports, 2018, 44(11), pp. 1001–1008 ((Scopus, Web of Science)

3. Васина Я.А., Щербак А.Н., Гаспарян Ю.М, Мирнов С.В. Исследование параметров пристеночной плазмы и определение скорости её продольного вращения с помощью зонда Маха в ходе литиевого эксперимента на токамаке Т-11М. //Физика плазмы. 2018. Т.44. №7. С. 564-571. (БАК)
Vasina Ya.A., Shcherbak A.N., Gasparyan Y.M., Mirnov S.V., Investigation of the Edge Plasma Parameters and Measurements of the Plasma Longitudinal Rotation Velocity by a Mach Probe in a Lithium Experiment on the T-11M Tokamak, Plasma Physics Reports, 2018, 44(7), pp. 657–663 (Scopus, Web of Science)

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в подготовке и проведении экспериментальных серий на токамаке Т-11М. Автором проведена обработка экспериментально полученных вольт-амперных характеристик зонда Маха. При непосредственном участии автора выполнен пламенный анализ образцов (анализ с помощью пламенного фотометра) с коллекторов лития. Обработка результатов пламенного анализа проведена автором лично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы (77 литературных источников). Общий объем работы составляет 103 страницы, включая 49 рисунков, 5 таблиц, 1 приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыта новизна работы, ее научная и практическая значимость, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1

Первая глава представляет собой литературный обзор по теме диссертации и посвящена изучению опыта использования жидкого лития на термоядерных установках.

Основной целью будущих токамаков является работа в стационарном режиме. В связи с этим возникает проблема выбора материала первой стенки: твердые материалы (Be, W) при взаимодействии с пристеночной плазмой токамака в условиях, близких к реакторным, разрушаются, их примеси «загрязняют» плазму, продукты эрозии накапливают тритий.

Альтернативой твердым обращенным к плазме компонентам, которая позволит решить многие из этих проблем, является использование обращенных к плазме компонентов с покрытием из жидких металлов. Во-первых, это позволяет реализовать непрерывно обновляемую поверхность, контактирующую с плазмой. Во-вторых, использование жидких металлов позволяет использовать охлаждение не только с помощью теплоносителя, но и охлаждение с помощью испарения, паровой экранировки, конвекции, или их комбинации. Это позволяет уменьшить тепловой поток на стенку.

Наиболее перспективными материалами для жидких обращенных к плазме компонентов являются такие металлы, как олово, галлий, литий. Наиболее изученным среди них является литий. Он обладает такими свойствами как низкая температура плавления (180°C), что позволяет ему легко плавиться и течь, высокая температура испарения, низкий заряд. Перспективным решением является использование жидкого лития, так как в отличие

от твердого, жидкий литий позволяет принимать на себя тепловые потоки из плазмы и осуществлять самовосстановление повреждённой поверхности контакта плазма-стенка.

Одним из первых предложенных вариантов использования лития в токамаках стал дивертор (UWMAK) с непрерывно текущим литием. В настоящий момент на установке EAST используется FLL лимитер (Flowed Li Limiter) [2].

Впервые положительное влияние лития на параметры плазмы было отмечено на токамаке TFTR, где с помощью лазера [3] в SOL во время разряда инжектировался литиевый аэрозоль. На рисунке 1.1 показаны параметры плазмы для разрядов с инжекцией лития и без. Получено наибольшее время удержания энергии ($\tau_E=270$ мс). Литий эффективно предотвратил попадание материала лимитера в плазму.

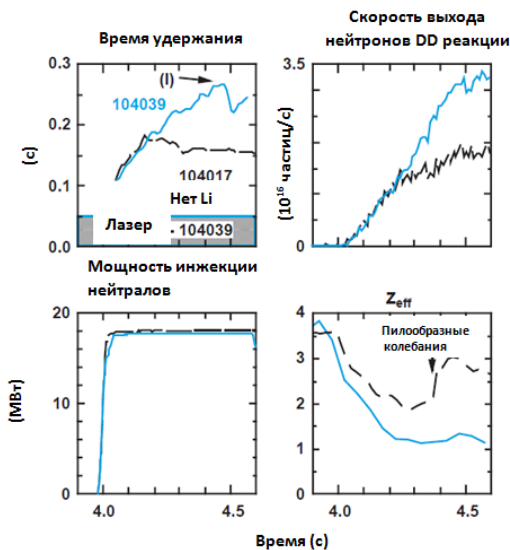


Рисунок 1.1 - Улучшения в параметрах плазмы при использовании инжекции лития на токамаке TFTR [3]

Также при применении инъекции был достигнут наибольший DD-нейтронный выход ($Q_{DD}=2,2*10^{-3}$) и при этом был достигнут самый низкий эффективный заряд ($Z_{eff}(0) = 1,2-1,3$). Этот результат особенно примечателен, так как достигнут с использованием мощного дополнительного нагрева без наличия дивертора. Применение инъекции привело к подавлению пилообразных колебаний (saw tooth) в центре шнура.

Далее, на установке NSTX применение лития привело к полному подавлению краевых колебаний - ELMов в разрядах с H режимом. Стабилизация ELMов происходит постепенно с увеличением количества лития аналогично увеличению удержания [4].

Другим перспективным методом использования лития в термоядерных установках являются впервые предложенные и реализованные в нашей стране капиллярно-пористые системы (КПС) для стабилизации жидкой поверхности [5]. Этот способ был впервые использован на токамаке T-11M [6]. На практике литиевые КПС изготавливают в виде большого числа металлических (молибден, вольфрам, нержавеющая сталь) сеточек с ячейкой от 10 до 100 мкм, которые спрессовывают и заполняют литием (Рисунок 1.2).

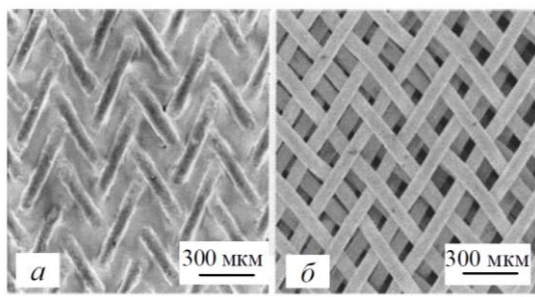


Рисунок 1.2 - Фотография капиллярно-пористой системы: а-заполненной литием; б – до заполнения [5]

Кроме текущего лития на токамаке EAST проводилась инъекция литиевого порошка в плазму в H-режиме во время длинных разрядов (>30 с) [7]. С помощью инъекции

предполагалось добиться восстановления нанесенного ранее литиевого покрытия на стенку. Уменьшилось количество разрядов со срывами. Удалось добиться рекордной длительности разряда 100 с.

Глава 2

Вторая глава посвящена описанию установки Т-11М и использованных диагностик и методов исследования. Она представляет собой бездиверторный токамак с вакуумной камерой круглого сечения. Основные параметры установки: $R=0,7$ м, $a=0,27$ м, $B_t=1$ Т, $I_p=70$ кА, длительность импульса ~ 250 мс. На рисунке 2.1. показаны основные компоненты установки. На токамаке испытываются прототипы литиевых лимитеров на основе КПС. В ходе экспериментов, представленных в работе, в камере токамака были установлены три литиевых лимитера на основе КПС: один вертикальный и два продольных. Каждый из лимитеров имел систему предварительного нагрева и мог использоваться как в качестве эмиттера лития, когда температура его поверхности была существенно выше 300°C (температура плавления лития равна 180°C), так и в качестве коллектора лития, когда температура его поверхности была ниже 300°C .

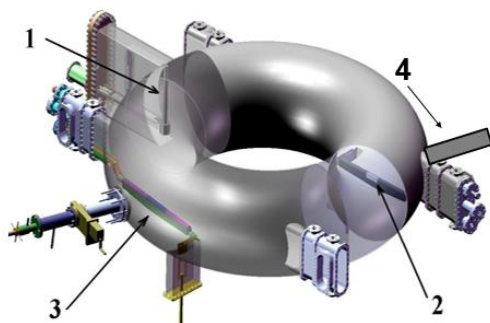


Рисунок 2.1 - Расположение основных элементов токамака Т-11М:
1- Вертикальный лимитер; 2 – Первый продольный лимитер; 3 –
Второй продольный лимитер; 4 – Зонд Маха

Для определения параметров пристеночной плазмы и скорости её продольного вращения в камеру токамака Т-11М был установлен зонд Маха, изготовленный АО «Красная звезда» [8]. Он представляет собой два цилиндрических вольфрамовых электрода диаметром 2 мм, частично покрытых изолятором. Электроды разделены пластинкой из стальной фольги (Рисунок 2.2.). Зонд можно вводить в камеру токамака на заданное расстояние, а также вращать с помощью разработанной АО «Красная Звезда» жидкометаллической муфты.



Рисунок 2.2 - Общий вид зонда Маха, установленного на токамаке Т-11М

Для наблюдения за поверхностью продольных лимитеров в ходе разряда на токамаке Т-11М дополнительно использовались:

- две высокоскоростные оптические камеры Baumer HXG20С. При необходимости во время съемки могут использоваться различные световые фильтры LiI (671 нм), LiII (549 нм) и Na (656 нм).

- две инфракрасные камеры Infracam VarioCam HD Head 680 и 880, работающие в диапазоне 7,5-14 мкм.

Данные, полученные с их помощью, позволяли получить распределения свечения (оптические камеры) и температуры поверхности литиевых коллекторов-эмиттеров (инфракрасные камеры) во времени в ходе разряда.

Для исследования количества лития, собранного коллекторами, установленными в пристеночной плазме токамака Т-11М, использовался пламенный фотометр ПФА-378. Этот прибор предназначен для измерения концентрации ионов щелочных и щелочно-земельных металлов в растворах путем измерения интенсивности их эмиссионных линий при распылении анализируемого раствора в пламени газовой горелки.

Глава 3

В третьей главе описываются результаты измерения параметров пристеночной плазмы (электронной температуры, ионного тока насыщения) в различных схемах расположения эмиттеров и коллекторов. Результаты, приведенные в данной главе, опубликованы в работах [8,9] Исследуемые схемы представлены на рисунке 3.1. Их можно разделить на два типа: симметричные (4) и несимметричные (1,2,3) относительно поверхности плазменного шнура. Так, например, в симметричном варианте поверхность лимитеров находится на одном уровне относительно границы плазменного шнура, а в несимметричном один из лимитеров системы находится ближе к центру плазменного шнура, чем другой.

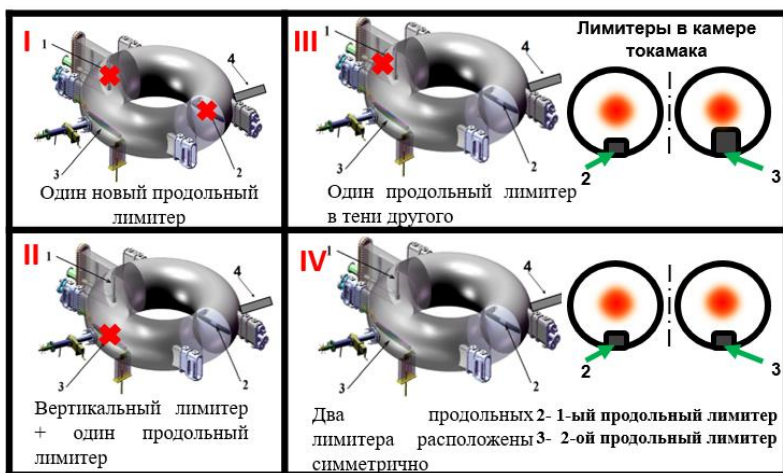


Рисунок 3.1 - Схемы расположения лимитеров в токамаке Т-11М.
Красные крестики означают отсутствие лимитера

С использованием интенсивности рекомбинационного свечения нейтрального лития на пластине зонда Маха была определена λ - характеристическая длина распределения лития в теневой зоне лимитера SOL (Scrape Of Layer) плазменного шнура – параметр, количественно характеризующий уход лития из плазменного шнура на стенку. Его уменьшение означает подавление ухода, а рост – напротив, увеличение ухода лития на стенку. Полученные результаты для различных систем расположения эмиттеров и коллекторов лития на Т-11М представлены на рисунке 3.2. в полулогарифмическом масштабе. Как можно видеть на рисунке, найденное таким образом значение λ практически одинаково для всех несимметричных систем и снижается в два раза при переходе от первой к четвертой (симметричной) схеме. Это означает, что переход к симметричной системе коллекторов привел к снижению радиального переноса лития в SOL, и, следовательно, к существенному уменьшению (до 5 раз) потерь лития на стенку.

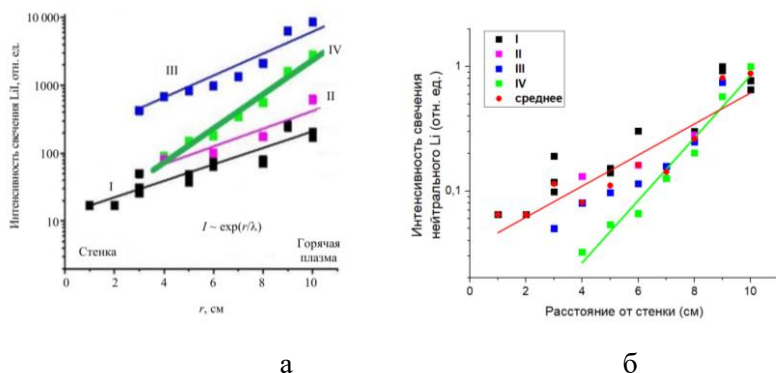


Рисунок 3.2 - Радиальное распределение свечения нейтрального лития у поверхности пластины зонда Маха: $\lambda = 3,1$ (I), $3,0$ (II), $3,65$ (III), $1,75$ см (IV) а) не нормированное распределение; б) нормированное распределение

Были получены радиальные распределения ионного тока насыщения и электронной температуры в симметричной (Рисунок 3.3) и несимметричной (Рисунок 3.4) системе коллекторов. Распределения в несимметричной системе обнаружили максимум

на расстоянии 4 см от стенки камеры. Такое поведение в условиях строго тороидальной симметрии магнитной конфигурации плазменного шнура токамака необъяснимо. Отклонение может указывать на образование магнитного острова вблизи лимитера в несимметричной системе из-за возмущения целочисленной ($q(r)=3,4$) магнитной поверхности локальным воздействием на нее коллектора.

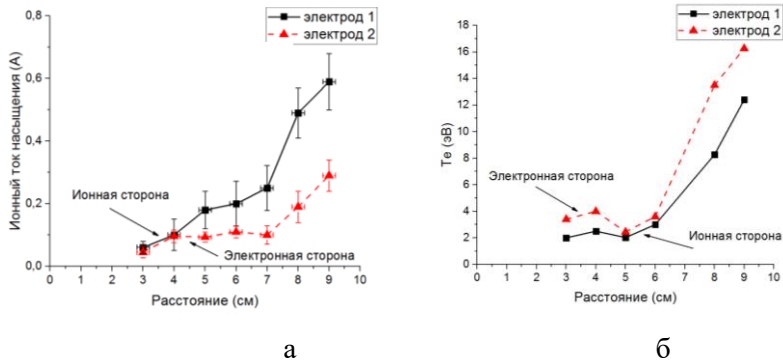


Рисунок 3.3 - Радиальное распределение ионного тока насыщения (а) и электронной температуры (б) в симметричной системе коллекторов

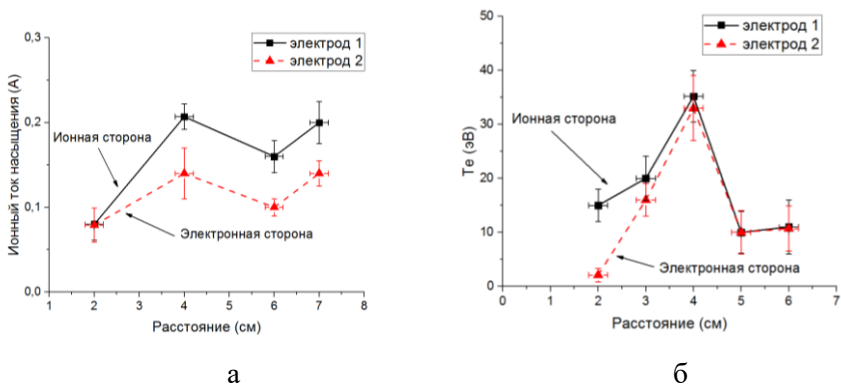


Рисунок 3.4 - Радиальное распределение ионного тока насыщения (а) и электронной температуры (б) в несимметричной системе коллекторов

Помимо радиального распределения была получена информация об угловом распределении литиевых потоков в SOL. Полученное распределение ионного тока насыщения показано на рисунке. Точки на распределении соединены плавной кривой для наглядности. В данном эксперименте зонд находился на расстоянии 7 см от стенки вакуумной камеры. Как можно видеть из распределения, ионные токи насыщения на первом и втором электроде при $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=180^\circ$ различаются. При $\varphi=0^\circ$ преобладает ток на электрод 1, а при $\varphi=180^\circ$ - ток на электрод 2. Принимая во внимание заданный отчет углов, можно сделать вывод о том, что ток на ионной стороне зонда больше, что говорит об анизотропии распределения литиевых потоков.

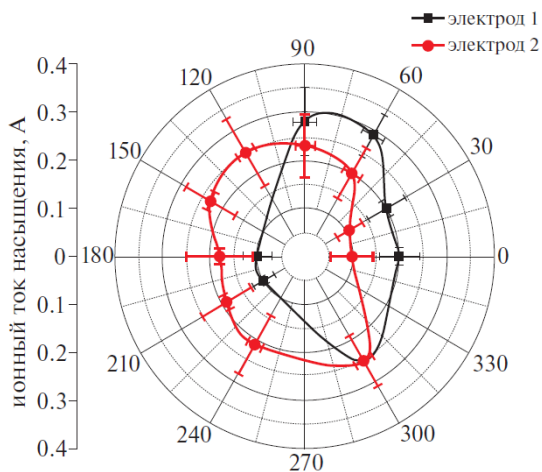


Рисунок 3.5 - Угловое распределение ионного тока насыщения (без вертикального лимитера). Зонд введен на 7 см

Другим отклонением от симметрии периферии плазменного шнура токамака Т-11М стало различие свечения лития на «ионной» и «электронной» сторонах коллекторов-эмиттеров («ионная» и «электронная» стороны, обращенные в направлении тока плазмы и тороидального магнитного поля соответственно). Было сделано предположение, что эта асимметрия вызвана вращением периферии плазменного шнура в Т-11М как целого.

Используя радиальные распределения ионного тока насыщения и электронной температуры, можно попытаться вычислить скорость такого вращения плазменного шнура. Измеренная таким образом скорость тороидального вращения оказалась направлена в ионную сторону и близка к половине скорости ионного звука для ионов Li^+ .

Прямым подтверждением возможности образования магнитного острова стал его провоцирующий модельный эксперимент по сдвигу плазменного шнура поперечным магнитным полем на слегка несимметричную систему (смещенных по вертикали на ~ 1 см) продольных лимитеров. В условиях тороидальной симметрии плазменного шнура его сдвиг на комбинацию слегка асимметричных продольных лимитеров не должен был бы изменить качественно соотношения потоков плазменной энергии на «основной» и «углубленный» лимитеры. Так и было, пока сдвиг был мал (1 см). Однако, когда он достиг 2 см, соотношение между лимитерами резко поменялось - ранее пониженный поток тепла на «углубленный» продольный лимитер, находящийся частично в тени первого, в 2 раза скачком превзошел поток на «основной» первый лимитер, как если бы сдвиг вызвал образование X-точки магнитного острова в зоне «углубленного» лимитера в ответ на образование O - точки в области «основного».

Предполагается следующий механизм образования магнитного острова. Его возможная причина – локальное возмущение тока плазмы вблизи целочисленного $q(r)$ при помещении в эту зону материального препятствия. Вокруг помещенного предмета (первого продольного лимитера) образуется область с пониженной плотностью тока плазмы (O-точка). Через 180° должна образоваться X-точка с концентрацией в ее зоне интенсивного теплового потока. Это положение соответствует второму продольному лимитеру.

Глава 4

В четвертой главе описываются экспериментальные данные по сбору лития различными типами продольных коллекторов. В ходе экспериментов использовались два вида коллекторов: гладкий

коллектор и КПС коллектор с различным количеством слоев КПС-сеток (2 или 4).

Методика проведения эксперимента состояла в следующем. Коллектор экспонировался в рабочих разрядах токамака Т-11М. После каждой экспериментальной серии сетка на поверхности коллектора срезалась и разделялась на 12 частей (6 с ионной стороны и 6 с электронной). Каждый полученный фрагмент помещался в отдельный стеклянный сосуд и заливался кипящей (100° С) дистиллированной водой. В случае с гладким коллектором литий смывался с каждого из пяти сегментов чистой бязью, смоченной в горячей дистиллированной воде, после чего она также помещалась в отдельный сосуд. В данном случае ионная и электронная сторона не разделялись из-за малого количества разрядов. Полученные растворы анализировались на пламенном фотометре ПФА-378 для определения количества лития.

Проведена экспериментальная серия из 1000 рабочих разрядов с продольным КПС-лимитером в качестве эмиттера лития и продольным КПС-коллектором лития с двумя слоями сетки. Средний сбор лития на поверхность коллектора составил 0,015 мкгр/см²/разряд.

Серия экспериментов с гладким коллектором состояла из 20 разрядов с вертикальным лимитером в качестве основного источника лития и продольным лимитером в качестве дополнительного источника. Средний сбор лития на гладкий коллектор составил 0,02 мкгр/см²/разряд. Таким образом, было установлено, что КПС-коллектор собирает литий в 5 раз лучше, чем гладкий. Это будет практически использовано при конструировании последующих коллекторов лития на основе КПС.

Заключение

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

В первой части работы на основании результатов, полученных с использованием зонда Маха, были определены характерные параметры пристеночной плазмы токамака Т-11М и обнаружено

макроскопическое вращение периферии плазменного шнура в направлении тока плазмы (т.е. ионного потока) вдоль тороидального магнитного поля со скоростью, близкой к ионнозвуковой. Тем самым удалось объяснить тот факт, что сбор лития на «ионной» стороне коллекторов в 2-3 раза превышает его сбор на «электронной» стороне.

Далее было установлено, что поперечная глубина проникновения лития (характеристическая длина λ) из горячей зоны плазменного шнура в SOL зависит от геометрии коллекторов лития, а именно уменьшилась с 3,5 см до 1,7 см при переходе от асимметричной по отношению к поверхности плазменного шнура к симметричной конфигурации;

- Тем самым, симметризация эмиттер-коллекторной системы привела к радикальному уменьшению потока лития на стенку, что может быть следствием подавления образования магнитных островов, возбуждаемых введением локальных коллекторов в плазму SOL;

- На основании этого в последующих токамаках рекомендуется использовать только симметричные эмиттер-коллекторные системы.

В третьей части работы исследовалась эффективность сбора лития на гладкий коллектор и КПС-коллектор с различным числом сеток. Количество лития, собранного коллектором, определялось с помощью метода пламенной фотометрии.

- Было показано, что КПС коллектор с двумя слоями сетки собирает в 5 раз лучше, чем гладкий коллектор. При этом после прохождения 2-х сеток на основании коллектора остается 12% от падающего потока, а после 4-х сеток – 2%;

- В последующих токамаках рекомендуется использовать коллекторы не менее чем с двумя слоями КПС-сетки.

Список литературы

1. Mirnov S. Tokamak evolution and view to future // Nucl. Fusion. 2018. Libk. 59.
2. Hu J.S. et al. First results of the use of a continuously flowing lithium limiter in high performance discharges in the EAST device // Nucl. Fusion. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of

Sciences, Hefei, Anhui, China: Institute of Physics Publishing, 2016. Libk. 56, № 4.

3. Mansfield D.K. et al. Observations concerning the injection of a lithium aerosol into the edge of TFTR discharges // Nucl. Fusion. 2001. Libk. 41, № 12. Or. 1823–1834.
4. Mansfield D.K. et al. Transition to ELM-free improved H-mode by lithium deposition on NSTX graphite divertor surfaces // J. Nucl. Mater. 2009. Libk. 390–391. Or. 764–767.
5. Мирнов С.В., Евтихин В.А. Применения Ga и Li как материала лимитеров в токамаках Т-3М и Т-11М // Вант. Сер. Термоядерный Синтез. 2005. № 2. Or. 3–18.
6. Evtikhin V.A. et al. Technological aspects of lithium capillary-pore systems application in tokamak device // Fusion Eng. Des. 2001. Libk. 56–57. Or. 363–367.
7. Sun Z. et al. Real time wall conditioning with lithium powder injection in long pulse H-mode plasmas in EAST with tungsten divertor // Nucl. Mater. Energy. Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, NJ, United States: Elsevier Ltd, 2019. Libk. 19. Or. 124–130.
8. Vasina Y.A., Shcherbak A.N., Gasparyan Y.M., Mirnov S.V., Investigation of the Edge Plasma Parameters and Measurements of the Plasma Longitudinal Rotation Velocity by a Mach Probe in a Lithium Experiment on the T-11M Tokamak, Plasma Physics Reports, 2018, 44(7), pp. 657–663 (Scopus, Web of Science)
9. Васина Я.А., Джурик А.С., Пришвицын А.С., Мирнов С.В., Лазарев В.Б. Оптимизация технологической системы замкнутого литиевого контура на токамаке Т-11М // ВАНТ Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т.43. вып.3. С. 47-59