

На правах рукописи

Сладкомедова Алсу Данияловна

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ПЛАЗМЫ
СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель	кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Толстяков Сергей Юрьевич
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой СПбГУ, профессор Овсянников Дмитрий Александрович
	кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИОФ РАН Мещеряков Алексей Иванович
Ведущая организация	Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"

Защита состоится «01» марта 2018 г. в 14:00 на заседании Диссертационного Совета Д002.205.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и на сайте www.ioffe.ru

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук

Красильщиков А.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Разработка новых безопасных и экологически чистых источников энергии в настоящее время является одной из самых востребованных задач. Использование энергии управляемого термоядерной синтеза (УТС) позволит решить проблему исчерпания углеводородных ресурсов, а также улучшить экологическую обстановку, связанную с выбросами углекислого газа от сжигания ископаемого топлива. В основе метода получения энергии за счет ядерного синтеза лежит осуществление реакции слияния легких ядер, например, дейтерия и трития. Реакция на основе дейтерия и трития считается в настоящее время наиболее перспективной, поскольку сечение данной реакции в широком диапазоне ионных температур выше, чем у других реакций [1]. В настоящее время для осуществления реакции синтеза широко используется магнитное удержание плазмы. В такой установке разогретая до температур в несколько десятков килоэлектронвольт (кэВ) плазма удерживается магнитными полями, создаваемыми как магнитными катушками, так и самой плазмой. Токамак является самым вероятным кандидатом на роль первого промышленного реактора, работающего на реакции УТС, и в настоящее время ведется сооружение первого экспериментального реактора на основе токамака – ITER (International Thermonuclear Reactor) [2]. Кроме того, существует ряд проектов, направленных на создание источника нейтронов на основе токамака [3, 4]. Источник нейтронов может быть использован для создания гибридного реактора, работающего по схеме синтез-деление, для переработки радиоактивных отходов, в установках для материаловедческих исследований в поддержку демонстрационных термоядерных реакторов типа DEMO [5] и для различных фундаментальных исследований [6, 7].

Перспективной конфигурацией для осуществления реакции ядерного синтеза в источнике быстрых нейтронов является сферический токамак,

который характеризуется низким аспектным отношением (отношением большого радиуса к малому) по сравнению с традиционными токамаками с аспектным отношением ≥ 2 . Достаточно высокое давление плазмы при относительно небольшой величине тороидального магнитного поля в сферическом токамаке позволяет получить высокое значение параметра β – отношения давления плазмы к давлению магнитного поля, – характеризующее экономическую эффективность работы реактора на основе реакции синтеза [8]. При этом плазма сферического токамака при высоких β значительно стабильнее по отношению к магнитогидродинамическим неустойчивостям, чем плазма традиционных токамаков, вследствие естественной вертикальной вытянутости плазмы и высокой треугольности [9].

Как в установке, представляющей собой реактор на основе термоядерного синтеза, так и в источнике нейтронов, необходимо максимизировать количество протекающих ядерных реакций и обеспечить необходимое отношение мощности ядерной реакции к мощности нагрева для осуществления условия горения плазмы. Радиационные потери плазмы (мощность электромагнитного излучения плазмы) являются неизбежным – и в проектах будущих токамаков-реакторов существенным – каналом потерь энергии [10, 11, 12, 13], поэтому их исследование необходимо для определения эффективности работы установок и прогнозирования параметров будущих реакторов и источников нейтронов.

Одной из основных проблем магнитного удержания являются высокие потоки энергии на диверторные пластины во время стационарной стадии разряда и во время стадии срыва плазмы. Вся энергия, которая не излучилась внутри сепаратрисы – последней замкнутой магнитной поверхности – поступает в SOL (Scrape-of-Layer – обдирочный слой плазмы), далее выходит в диверторную область и на поверхность стенки. Для снижения тепловых потоков на современных токамаках широко используется напуск примесей

для излучения части энергии плазмы. При этом необходимо избегать накопления примесей в центре плазмы, поскольку это приводит к разбавлению топлива. Кроме того, высокое содержание примесей в центре может привести к охлаждению плазмы за счет потерь энергии на излучение и снизить тем самым КПД реактора.

Поэтому исследования радиационных потерь плазмы и процессов переноса примеси, проведенные в диссертации, являются важной и актуальной темой исследований.

Цели и задачи исследования

Основными целями работы явились:

- Исследование полных радиационных потерь плазмы и мощности излучения плазмы в различных спектральных диапазонах в зависимости от параметров плазмы и методов нагрева на сферическом токамаке Глобус-М.
- Исследование роли радиационных потерь в энергобалансе плазмы сферического токамака Глобус-М.
- Исследование пространственного распределения радиационных потерь плазмы и радиального переноса собственной примеси плазмы – углерода – на сферическом токамаке Глобус-М.
- Исследование радиационных потерь при формировании профиля плотности путем инъекции быстрой плазменной струи на токамаке Глобус-М.

Для достижения этих целей были поставлены следующие задачи:

1. Разработка диагностики пространственного распределения радиационных потерь на сферическом токамаке Глобус-М.
2. Разработка и применение алгоритма для реконструкции двумерного в полоидальном сечении профиля радиационных потерь на токамаке Глобус-М.
3. Создание экспериментальной базы данных по измерениям радиационных потерь на токамаке Глобус-М для диапазона электронных

плотностей $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} - 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, величин тока плазмы 125 – 240 кА, величин тороидального магнитного поля 0,4 – 0,5 Тл, в случае зазора между плазмой и стенкой 2 – 3 см для режимов омического нагрева и нагрева плазмы методом инъекции пучка быстрых атомов с различным изотопным составом плазмы, для случая формирования профиля плотности плазмы инъекцией быстрой плазменной струи.

4. Моделирование транспортных процессов основной плазмы и углерода в омическом режиме нагрева плазмы токамака Глобус-М.

Научная новизна

Измерения радиационных потерь для классических токамаков с большим аспектным отношением представлены довольно широко, однако результаты исследований мощности излучения плазмы в зависимости от различных параметров плазмы ограничены. Для сферических токамаков известны результаты измерений на CDX-U и NSTX, для которых были отмечены довольно низкие значения радиационных потерь из основного объема плазмы от вкладываемой мощности нагрева. Диагностический комплекс радиационных потерь на этих сферических токамаках отличается от приведенного в данной работе меньшим числом каналов и отсутствием измерений двумерного в полоидальном сечении токамака распределения радиационных потерь. Относительная новизна концепции сферических токамаков и ограниченность экономических ресурсов являются основными причинами, определяющими недостаточные исследования в данном направлении.

- Впервые на сферических токамаках разработана и внедрена система диагностики мощности излучения плазмы, основанная на наборе линеек SPD (Silicon Precision Detector) и дискретных фотодиодах SPD, регистрирующих излучение в различных спектральных диапазонах.
- Впервые на сферических токамаках экспериментально исследована зависимость радиационных потерь от электронной плотности, тока плазмы,

тороидального магнитного поля, зазора между плазмой и стенкой, метода нагрева плазмы, изотопного состава плазмы, а также вклад в полные радиационные потери различных спектральных диапазонов.

- Впервые на сферических токамаках получено экспериментальное двумерное распределение радиационных потерь плазмы в полоидальном сечении токамака. В частности, впервые для условий компактного сферического токамака Глобус-М разработан и применен алгоритм для реконструкции двумерного профиля радиационных потерь в полоидальном сечении плазмы на основе хордовых измерений в 280 каналах.
- Впервые на компактном сферическом токамаке Глобус-М проведено исследование влияния экспериментально измеренных радиационных потерь плазмы на оценку коэффициента электронной температуропроводности и времени удержания энергии.
- Впервые на токамаках проведено исследование радиационных потерь при формировании профиля плотности путем инъекции быстрой плазменной струи.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что

- Токamak Глобус-М был оснащен диагностическим комплексом, позволяющим измерять пространственное распределение и эволюцию электромагнитного излучения плазмы в различных спектральных диапазонах: от инфракрасного излучения (1 эВ) до рентгеновского излучения (15 кэВ).
- Создана экспериментальная база данных, основанная на измерениях радиационных потерь плазмы для широкого диапазона электронных плотностей, тока плазмы и тороидального магнитного поля, зазора между внешней границей плазмы и стенкой, а также в зависимости от метода нагрева и изотопного состава плазмы, что позволило расширить знания о радиационных потерях плазмы с собственной примесью.

- Разработанный программный код для томографической реконструкции двумерного распределения радиационных потерь плазмы на основе измерений, выполненных с помощью матрицы фотодиодов SPD 16×16 и линейки SPD 1×24 , позволил получать распределение радиационных потерь в полоидальном сечении плазмы и может быть использован на других плазменных установках.
- Измерение распределения радиационных потерь позволило создать транспортную модель плазмы сферического токамака Глобус-М, учитывающую потери на электромагнитное излучение плазмы, а также провести моделирование радиального переноса углерода в плазме; данные об абсолютных значениях радиационных потерь из основного объема плазмы позволили провести анализ баланса мощности в плазме токамака.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка диагностического комплекса радиационных потерь, позволяющего измерять мощность электромагнитного излучения в диапазоне энергии 1 эВ – 15 кэВ из основного объема плазмы токамака Глобус-М.
2. Разработка алгоритма для реконструкции двумерного распределения мощности излучения плазмы из единицы объема в полоидальном сечении токамака на основе хордовых измерений радиационных потерь плазмы токамака. Применение разработанного алгоритма для реконструкции экспериментального двумерного профиля радиационных потерь плазмы в полоидальном сечении токамака Глобус-М.
3. Экспериментальное исследование зависимости радиационных потерь от параметров плазмы в различных режимах работы токамака Глобус-М. Создание экспериментальной базы данных по измерениям радиационных потерь плазмы, включая их пространственное и временное распределение, для различных режимов токамака Глобус-М.

Достоверность и апробация результатов

Результаты выполненных измерений радиационных потерь плазмы не противоречат измерениям мощности нагрева плазмы и потока тепла, выполненных с помощью имеющихся на токамаке Глобус-М диагностик. Выполненные измерения находятся в соответствии с проведенным в данной работе моделированием, для которого были также использованы данные других диагностик. Реконструированные измеренные значения радиационных потерь не противоречат результатам с других токамаков – сферических и традиционных. Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в реферируемых журналах, доложены на российских и международных конференциях, а также на семинарах лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А. Ф. Иоффе и лаборатории физики улучшенного удержания плазмы токамаков Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация изложена на 170 страницах, содержит 56 рисунков и 6 таблиц; список литературы содержит 186 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели, задачи, методология и методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов.

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвященный роли радиационных потерь в энергобалансе плазмы. Рассмотрены ограничения, которые накладывает содержание примесей и их излучение на параметры будущего термоядерного реактора. Приведены экспериментальные значения

доли радиационных потерь от мощности нагрева, полученные на различных установках.

В параграфе 1.1 показано, что небольшое содержание примесей в плазме может существенно сузить диапазон параметров плазмы в реакторе на основе УТС. Рассмотрены основные источники возникновения примесей в плазме. Обсужден вопрос о снижении потоков тепла на диверторные пластины посредством преобразования части энергии плазмы в радиационные потери. Дан обзор данных о доле радиационных потерь плазмы от мощности нагрева для ряда токамаков с традиционным аспектным отношением и для сферических токамаков.

В параграфе 1.2 изложены теоретические основы процессов радиального переноса тепла и частиц в плазме токамака. Указаны основные параметры плазмы, влияющие на столкновительный перенос в плазме токамака, а также неустойчивости, которые могут приводить к аномальному переносу в плазме. Приведен обзор исследований переноса примеси на сферических токамаках.

Во второй главе изложены теоретические основы исследований радиационных потерь плазмы. Представлен обзор различных моделей равновесия плазмы, используемых для описания населенностей энергетических уровней частиц и излучательных характеристик плазмы. Дан обзор механизмов возникновения радиационных потерь плазмы и рассмотрены соответствующие виды излучения плазмы. Приведены методы измерения мощности излучения плазмы в установках с магнитным удержанием. Обсуждены принципы работы детекторов для измерения радиационных потерь, их основные преимущества и недостатки, практика применения на различных установках.

В параграфе 2.1 рассмотрены модели равновесия плазмы, в рамках которых может осуществляться расчет интенсивности излучения при переходах электронов между энергетическими уровнями, и области

применимости моделей. Представлены теоретические основы корональной и столкновительно-излучательной моделей.

В параграфе 2.2 обсуждены механизмы возникновения радиационных потерь плазмы и соответствующие виды излучения плазмы: тормозное, рекомбинационное, линейчатое, циклотронное. Приведены выражения для расчета основных видов излучения плазмы, обсужден их вклад в общие радиационные потери плазмы. В современных токамаках механизм излучения, который вносит определяющий вклад в радиационные потери плазмы, – линейчатое излучение.

В параграфе 2.3 дан обзор методов измерения радиационных потерь плазмы. Рассмотрено устройство детекторов, принцип работы которых основан на нагреве материала за счет поглощения падающего излучения, – болометров. Они характеризуются постоянной спектральной характеристикой во всем диапазоне длин волн излучения, однако имеют небольшое временное разрешение (порядка миллисекунды), и, как правило, низкую чувствительность. Приведено описание принципа работы и основные характеристики кремниевых полупроводниковых фотодиодов SPD [14] и AXUV (Absolute eXtreme Ultraviolet) [15]. Эти детекторы обладают более высоким временным разрешением (порядка микросекунды) и более просты в эксплуатации по сравнению с болометрами. Основной недостаток для использования таких детекторов – неоднородная спектральная чувствительность в области низких энергий (1 – 30 эВ).

Третья глава представляет собой описание сферического токамака Глобус-М и применяемых методов исследования. Приведены характеристики разработанной диагностики радиационных потерь плазмы на основе кремниевых фотодиодов SPD и геометрия эксперимента (рисунок 1). Рассмотрены теоретические основы принципов томографии. Представлен разработанный алгоритм реконструкции радиационных потерь плазмы токамака Глобус-М на основе хордовых измерений с помощью матрицы фотодиодов 16×16 и линейки 1×24 , результаты его тестирования на

модельных профилях. Представлены принципы работы компьютерных кодов для расчета транспортных характеристик плазмы АСТРА [16] и STRANL [17].

Параграф 3.1 содержит описание параметров токамака Глобус-М, инжектора атомов высокой энергии для дополнительного нагрева плазмы, плазменной пушки для формирования профиля плотности в плазме токамака. Приведены характеристики основных диагностик токамака, использованных в работе.

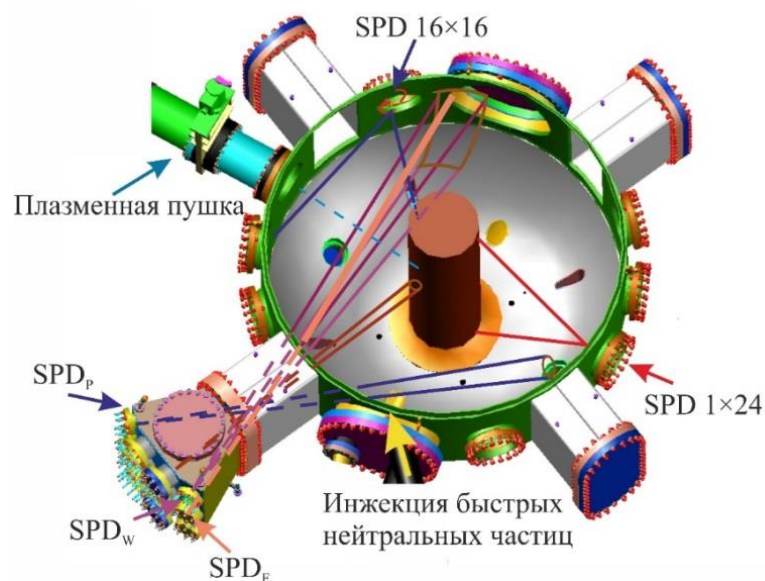


Рисунок 1. Геометрия эксперимента. Дискретные фотодиоды: SPD_w – обзорный, SPD_p – периферийный, SPD_f – четырехканальный спектрометрический модуль. Многоканальные детекторы: SPD 16×16 – матрица фотодиодов, SPD 1×24 – линейка фотодиодов.

В параграфе 3.2 обсуждены характеристики разработанного диагностического комплекса для измерения радиационных потерь плазмы токамака Глобус-М. Рассмотрены характеристики детекторов на основе дискретных фотодиодов SPD, линейки фотодиодов SPD 1×24 и матрицы SPD 16×16, фильтры, выбранные для спектрометрического модуля для измерения мощности излучения плазмы в различных диапазонах длин волн, и соответствующие спектральные характеристики различных каналов. Приведены параметры системы сбора данных.

В параграфе 3.3 рассмотрены принципы решения обратной задачи на основе нелокальных (хордовых) измерений. Изложены теоретические основы

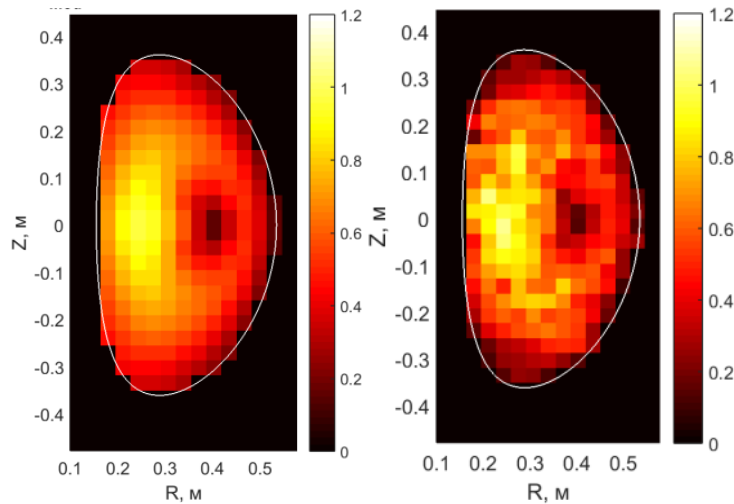


Рисунок 2. Изображение модельного профиля (слева) и восстановленного при относительном шуме 20% в «измеренных» сигналах (справа). Профиль представлен в относительных единицах.

итерационных методов для решения обратной задачи. Рассмотрен метод определения оптимального параметра регуляризации – метод невязки.

В параграфе 3.4 представлены разработанный автором алгоритм восстановления двумерного профиля радиационных потерь и результаты тестирования алгоритма на модельных профилях с различным уровнем шума в «измеренных» сигналах. Показано, что при наличии 20% белого шума в исходных сигналах алгоритм позволял восстанавливать профиль излучения и прослеживалась общая структура распределения (рисунок 2). Описан разработанный автором метод определения «эффективной» чувствительности фотодиодов на основе теоретических предсказаний интенсивности излучения линий примеси в области низких энергий и измерений мощности излучения плазмы в различных спектральных диапазонах с помощью четырехканального модуля на основе SPD.

Параграф 3.5 посвящен описанию работы одномерных транспортных кодов АСТРА и STRANL. Код АСТРА включает уравнения переноса энергии и частиц основной плазмы и уравнение переноса для полоидального потока. Код STRANL предназначен для моделирования переноса примеси плазмы и ее излучательных характеристик. В обоих кодах расчет осуществляется для усредненных по магнитной поверхности параметров плазмы. Использование

методов для численного решения некорректной и плохо обусловленной задачи. Рассмотрен метод регуляризации Тихонова и различные формы ограничивающего функционала: изотропный и анизотропный. Описаны основы принципа максимума энтропии и

кода STRAHL в данной работе было осуществлено совместно с кодом АСТРА.

Четвертая глава посвящена результатам реконструкции экспериментального двумерного профиля мощности излучения, экспериментальному исследованию зависимости радиационных потерь от параметров плазмы и исследованию переноса основных частиц плазмы, тепла и примеси (углерода) плазмы токамака Глобус-М.

Параграф 4.1 посвящен исследованию зависимости радиационных потерь и мощности излучения в различных спектральных диапазонах от параметров плазменного разряда. Показано, что основная примесь плазмы Глобус-М – углерод, а радиационные потери плазмы в разрядах с полностью углеродной стенкой и в разрядах с установленным внешним нижним вольфрамовым диверторным поясом не отличались в пределах ошибки измерения. Радиационные потери из основного объема плазмы (внутри сепаратрисы) росли с ростом электронной плотности. В режиме с нагревом плазмы нейтральным пучком радиационные потери возрастали по сравнению с потерями в омическом режиме нагрева. Мощность излучения в дейтериевой плазме имела более высокие значения, чем в водородной в омическом режиме нагрева. При инжекции дейтериевого пучка в дейтериевую плазму радиационные потери также были выше по сравнению с режимом инжекции водородного пучка в водородную плазму [А1].

Для рассмотренного диапазона электронных плотностей радиационные потери из основного объема плазмы с $\rho_{pol} \leq 0,9$ в дейтериевой плазме с омическим нагревом составили 18–75 кВт, что составило 5–25% от вкладываемой мощности нагрева, в режиме с инжекцией быстрых атомов дейтерия в дейтериевую плазму – до 75–130 кВт, что составило 18–30% от поглощенной мощности нагрева.

Показано, что при уменьшении зазора между внешней границей плазмы и стенкой токамака с 3 см до 2 см радиационные потери в омическом режиме нагрева возрастают, особенно сильно – для высоких электронных

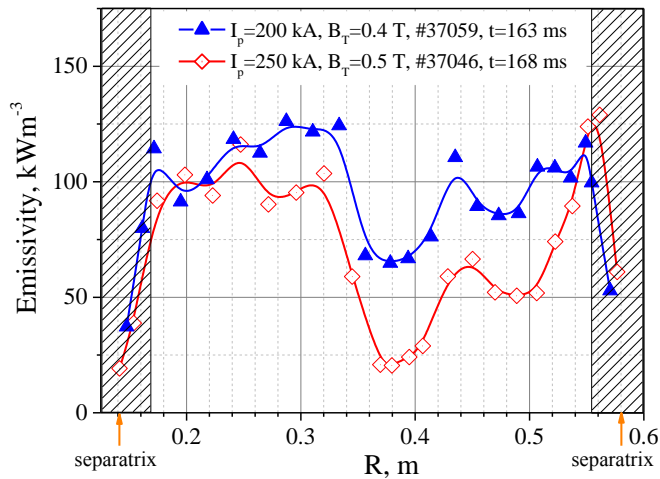


Рисунок 3. Распределения радиационных потерь, усредненные по полоидальным магнитным поверхностям (отдельно для стороны сильного и слабого магнитных полей), для случаев $I_p=200$ кА, $B_T=0,4$ Тл (разряд №37059) и $I_p=250$ кА, $B_T=0,5$ Тл (разряд №37046).

плотностей. Процедура боронизации вакуумной стенки токамака способствовала уменьшению радиационных потерь плазмы на 40% от значения до боронизации, при этом радиационные потери сохранялись на этом уровне на протяжении 400 разрядов с суммарной продолжительностью 25 с плазменного разряда.

Было продемонстрировано, что разработанный алгоритм восстановления профиля радиационных потерь с использованием анизотропного ограничивающего функционала позволяет восстанавливать двумерное распределение радиационных потерь плазмы как в диверторной, так и в лимитерной конфигурации разряда. Показано, что с ростом тока плазмы и тороидального магнитного поля центральные радиационные потери снижаются (рисунок 3), что связано, в первую очередь, с ростом электронной температуры.

В параграфе 4.2 приведены результаты транспортного моделирования основной плазмы в омическом режиме нагрева. Рассмотрена роль экспериментально измеренных радиационных потерь в энергобалансе всей плазмы, включая наблюдаемую диагностикой радиационных потерь часть SOL и диверторной области. Исследовано влияние радиационных потерь плазмы, измеренных в эксперименте, на расчет времени удержания энергии и электронной температуропроводности.

В параграфе 4.3 исследован перенос основной примеси плазмы – углерода – в омическом режиме нагрева плазмы с помощью кодов АСТРА и STRANL. Рассчитан профиль концентрации, обеспечивающий наблюдаемые

в эксперименте напряжение на обходе и распределение радиационных потерь. Соответствующий уровень концентрации углерода составлял около 8% от электронной плотности.

Параграф 4.4 посвящен исследованию деградации фотодиода SPD. Показано, что в течение двухлетней эксплуатации фотодиода с соответствующей суммарной поглощенной энергией электромагнитного излучения 10 мДж/см^2 ампер-ваттная чувствительность детектора не изменилась.

В параграфе 4.5 обсужден процесс проникновения водородной и гелиевой плазменной струи в дейтериевую плазму токамака. Приведены результаты измерения радиальной координаты и скорости проникновения с помощью быстрой матрицы фотодиодов SPD 16×16 . Измеренные в эксперименте времена замедления для водородной и гелиевой плазменной струи сопоставлены со временами торможения за счет градиента и кривизны магнитного поля и альфвеновской проводимости. Времена торможения были рассчитаны согласно формулам, приведенным в работе [18].

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Разработан диагностический комплекс радиационных потерь, позволяющий измерять абсолютные значения мощности электромагнитного излучения плазмы в диапазоне энергии 1 эВ – 15 кэВ из основного объема плазмы токамака Глобус-М.
2. Разработан алгоритм реконструкции двумерного распределения мощности излучения плазмы из единицы объема в полоидальном сечении токамака на основе хордовых измерений радиационных потерь плазмы токамака. Осуществлена реконструкция экспериментального двумерного профиля радиационных потерь плазмы в полоидальном сечении токамака Глобус-М.
3. Экспериментально исследована зависимость радиационных потерь плазмы токамака Глобус-М от электронной плотности, изотопного состава, тороидального магнитного поля, тока плазмы, положения плазменного шнура и методов нагрева. За период работы диагностики радиационных потерь накоплена

экспериментальная база данных по измерениям радиационных потерь, включающая в себя хордовые измерения с помощью дискретных фотодиодов (~7000 разрядов) и многоканальных детекторов (несколько тысяч разрядов).

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основные результаты работы представлены в 8 докладах на конференциях и в 3 статьях в реферируемых журналах:

A1. Ибляминова А.Д., Авдеева Г. Ф., Аруев П. Н., Бахарев Н. Н., Гусев В. К., Забродский В. В., Курские Г. С., Минаев В. Б., Мирошников И. В., Патров М. И., Петров Ю. В., Сахаров Н. В., Толстяков С. Ю., Щёголев П. Б. Исследование мощности излучения плазмы токамака Глобус-М с помощью кремниевых фотодиодов SPD // Физика плазмы – 2016. – Т. 42 – № 10 – С. 1–12.

A2. Ибляминова А.Д., Толстяков С.Ю., Курские Г.С., Березуцкий А.А., Петров Ю.В., Забродский В.В. Определение радиационных потерь плазмы токамака Глобус-М с использованием кремниевых фотодиодов SPD. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-Математические науки – 2012. –Т.158 – С. 70-74.

A3. Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V., Bakharev N.N., Ibyaminova A.D., Shchegolev P.B., Avdeeva G.F., Kiselev E.O., Minaev V.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu. Scaling of energy confinement time in the Globus-M spherical tokamak // Plasma Phys. Control. Fusion –2017, T. 59, C.045010.

Литература, цитируемая в автореферате

1. Bosch H.-S., Hale G.M. Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities Nuclear Fusion, Volume 32, Number 4
2. 2016 Annual report / ITER Organization. St. Paul-les-Durance, 2016
3. Kuteev V.V. Azizov E.A., Bykov A.S. et al. Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils // Nuclear Fusion – 2011. – Т. 51– № 7 – С. 73013.

4. Menard J.E., Brown T., El-Guebaly L. et al. Fusion nuclear science facilities and pilot plants based on the spherical tokamak // Nuclear Fusion – 2016. – Т. 56 – № 10 – С.106023
5. Federici G., Biel W., Gilbert M.R. et al. European DEMO design strategy and consequences for materials // Nuclear Fusion. –2017. – Т. 57 – № 9 – С. 092002
6. Кутеев Б.В., Гончаров П.Р., Сергеев В.Ю., Хрипунов В.И. // Физика плазмы. 2010. – Т. 36 – № 4 - С. 307-346
7. Гончаров П.Р., Кутеев Б.В., Голиков А.А. и др. Сопоставление нейтронного выхода классических и сферических токамаков // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2011, вып. 2
8. Sykes A., Turner M.F., Patel S // Controlled Fusion and Plasma Physics Proc. 11th Europ. Conf. Aachenю. –1983. – Т. VIID – С. 363
9. Gusev V., Alladio F., Morris A. The basics of spherical tokamaks and progress in European research // Plasma Phys. Control. Fusion. –2003. – Т. 45, С. A59–A82
10. ITER Physics Basis // Nuclear Fusion. –1999. – Т. 39 – № 12
11. Lux H., Kemp R., Ward D. J., Sertoli M. Impurity Radiation in DEMO systems modelling // Fusion Engineering and Design. –2015. –Т. 101 – С. 42-51
12. Zohm H. et al. Recent ASDEX Upgrade research in support of ITER and DEMO // Nuclear Fusion. –2015. – Т. 55 –С. 104010
13. Zohm H., C. Angioni, E. Fable et al. On the physics guidelines for a tokamak DEMO // Nuclear Fusion. –2013. – Т. 53 – № 7
14. Artyomov A. P., Aruev P. N., Baksht E. H. et al. // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. –Т. 58 – № 1 – С. 102
15. Korde R., Cable J., Canfield L. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1993. – Т. 40 – С. 1655
16. Pereverzev G.V. ASTRA, Technical Report IPP 5/98, Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik, 2002
17. Dux R. STRAHL, Annual IPP report 10/30, Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik, 2002
18. Rozhansky V., Senichenkov I., Veselova I. et al. Penetration of supersonic gas jets into a tokamak. // Nuclear Fusion. –2006. –Т. 46 – С. 367–382