

На правах рукописи

Фэн Бэйюань

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА "ГЛОБУС-М" С ПОМОЩЬЮ БО-
ЛОМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

Автореферат

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор,
Кутеев Борис Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор,
Соминский Геннадий Гершевич

старший научный сотрудник
кандидат физико-математических наук,
Аскинази Леонид Георгиевич

Ведущая организация: ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

Защита состоится □ « 20 » 02 2003 г. В 16 часов на заседании диссертационного совета Д212.229.01 при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II учебный корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГТУ
Автореферат разослан □ □ « 23 » 01 2003 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
профессор

И.А. Водоватов

Актуальность темы

В последнее время при разработках техники и технологии для реализации управляемого термоядерного синтеза повышенное внимание уделяется исследованиям физики плазмы в сферических токамаках (СТ) [1].

Данные установки, характеризующиеся близкими значениями малого a и большого R радиусов, обладают возможностью работы с высоким отношением β газокINETического nT и магнитного $B^2/8\pi$ давлений, что позволяет создавать более компактные и экономичные токамаки. Первые эксперименты, выполненные на токамаке START, и последующие на токамаках MAST и NSTX подтвердили предсказываемые теорией хорошие МГД устойчивость и удержание плазмы [2-4]. Для проведения программы сферических токамаков в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН был запущен токамак Глобус-М [5]. Экспериментальные исследования физики сферических токамаков на нем, по сути, только начинаются.

Получение сведений об энергобалансе плазмы является одной из основных задач на данном этапе. Ее решение предполагает, наряду с изучением транспортных свойств плазмы, определение радиационных потерь, обусловленных тормозным и линейчатым излучением примесей. К моменту начала диссертационной работы данные о временах удержания в плазме сферических токамаков с учетом радиационных потерь были ограничены, а на российских установках – вообще отсутствовали.

Для измерения радиационных потерь на токамаках были разработаны несколько типов болометрических диагностик [6]. Каждый из болометров: металлический, пироэлектрический, полупроводниковый; обладает определенными достоинствами и недостатками, но ни один из них не является универсальным, что приводит к необходимости выбора схемы болометрической диагностики в зависимости от параметров плазменной установки. Первые данные о радиационных потерях получены на сферических токамаках совсем недавно [7]. Разработка болометрической диагностики для СТ сопровождается дополнительными сложностями в связи с относительной чистотой плазмы и малым уровнем излучения.

Цели работы:

Данная диссертация посвящена разработке болометрической диагностики и экспериментальному исследованию радиационных потерь в плазме сферического токамака Глобус-М.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Получены первые данные об абсолютных значениях мощности радиационных потерь в плазме сферического токамака «Глобус-М», которые свидетельствуют о низкой концентрации примесей в разряде.

2. Созданы широкообзорные и коллимированные пироэлектрические болометры, способные работать в условиях интенсивных звуковых помех на токамаках. Разработанные датчики обеспечивают рекордный частотный диапазон до 40 кГц, который открывает возможность их применения для изучения МГД-процессов.

Практическая значимость работы заключается в создании комплекса аппаратуры, способного проводить абсолютные измерения мощности радиационных потерь в сферическом токамаке. Впервые, данные о радиационных потерях позволили уточнить транспортные характеристики плазмы СТ Глобус-М. Показана возможность применения болометров с широким частотным диапазоном для изучения МГД-процессов. Разработанные методы могут быть использованы и на других, в том числе не сферических токамаках.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований радиационных потерь плазмы в омических режимах сферического токамака «Глобус-М». Уровень радиационных потерь не превышает 30-40 % от омической мощности, что свидетельствует о низком уровне примесей.
2. Методика абсолютной калибровки датчиков радиационных потерь в условиях экспериментов на сферическом токамаке «Глобус-М».
3. Новый комплекс аппаратуры для измерений абсолютной мощности радиационных потерь в сферическом токамаке «Глобус-М». Комплекс обеспечил измерения с высоким временным разрешением, соответствующим полосе пропускания до 40 кГц, и чувствительностью до $1.43 \text{ В} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$. Он позволил наблюдать быстрые процессы в плазме и исследовать корреляции с сигналами МГД-зондов и излучением водорода и примесей.

Апробация работы:

В диссертацию включены материалы, опубликованные в работах [1-4], которые были выполнены в период с 1998 по 2002 год. Результаты исследований публиковались в сборниках и докладывались на Всероссийских конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород 2001 – 2002) [1,2], Инженерные проблемы УТС [3], а также опубликованы в журнале “Письма в ЖТФ” [4].

Структура и объем диссертации:

Диссертация содержит введение, четыре главы и заключение. В диссертации 69 страниц печатного текста, в том числе 25 рисунков, 6 таблицы и список литературы, включающий 83 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, описана новизна полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложена структура диссертации.

В первой главе приводится обзор литературы, посвященный исследованию удержания энергии в токамаках и наблюдениям радиационных потерь.

В разделе 1.1 обсуждаются исследования удержания энергии в горячей плазме токамаков. Указывается на необходимость достижения высоких значений термоядерного производства для создания эффективного реактора. Обсуждаются подходы к реализации режимов улучшенного удержания энергии и частиц в плазме. На основе экспериментальных данных, полученных на различных установках, делается вывод о реальности создания установок термоядерного синтеза в ближайшие годы.

Далее рассмотрены особенности сферических токамаков как магнитных ловушек с перспективными свойствами. Наиболее привлекательными чертами СТ являются высокие значения параметра «бета» и повышенная МГД устойчивость.

Анализ данных о времени удержания энергии в токамаках приводит к выводу об аномально высоком уровне потерь, которые могут быть описаны эмпирическими скейлингами. Наиболее точно время удержания предсказывается скейлингом ITERa. Обращается внимание на то, что радиационные потери влияют на значения времени удержания, и на недостаточность имеющихся данных о времени удержания энергии в сферических токамаках. В параграфе 1.2 обсуждаются аппаратура для измерения радиационных потерь и современное состояние болометрических исследований на токамаках. Описываются основные типы датчиков. Анализируются их достоинства и недостатки. Делается вывод о необходимости конструирования аппаратуры с учетом особенностей сферических токамаков. В заключение приводятся требования к болометрическим системам реактора.

В параграфе 1.3 сформулированы выводы из обзора литературы и основные задачи диссертационной работы:

1. Разработать болометрическую диагностику для сферического токамака «Глобус-М» и провести экспериментальные исследования радиационных потерь в его плазме.
2. Измерить абсолютную мощность радиационных потерь в плазме сферического токамака «Глобус-М»
3. Рассмотреть энергобаланс плазмы сферического токамака «Глобус-М» и получить оценку энергетического времени жизни в нем с учетом экспериментальных данных о радиационных потерях.

Вторая глава посвящена описанию токамака Глобус-М.

В параграфе 2.1. приведено описание установки и ее особенностей. Токамак имеет большой радиус 0.36 м и малый -0.24 м, что соответствует аспектному отношению 1.5. Это значение аспектного отношения характерно для сферических токамаков. Общий объем плазмы в токамаке составляет 1.1 кубический метр. Ток разряда в установке достигает 0.5 МА, а тороидальное магнитное поле 0.6 Т. Эти параметры выводят токамак в область эффективного омического нагрева плазмы. Предельные режимы работы описаны в параграфе 2.2.

В параграфе 2.3. описано, что дополнительно к омическому на токамаке планируется использовать высокочастотные методы нагрева и нейтральную инжекцию с общей мощностью до 8 МВт, что более чем в 10 раз превышает характерную мощность омического нагрева. Расчеты предсказывают высокую эффективность поглощения высокочастотных волн и нагревных пучков в плазме установки.

В настоящее время токамак вышел на расчетный омический режим, который характеризуется током до 300 кА, длительностью разряда до 100 мс и напряжением на обходе 2-3 В.

Конструкция токамака позволяет эффективно размещать на нем диагностические системы, которые описаны в параграфе 2.4. В первую очередь были запущены магнитные диагностики, которые фиксируют положение шнура и МГД активность. Мониторинг шнура во время разряда осуществляется видеокамерой. Плотность измеряется СВЧ-интерферометром и Томсоновским рассеянием. Для измерения температуры электронов используются радиометр и датчик мягкого рентгеновского излучения. Отдельно фиксируется жесткое рентгеновское излучение, указывающее на появление убегающих электронов.

В третьей главе описывается разработанная автором оригинальная болометрическая аппаратура.

В параграфе 3.1 приводится конструкция датчиков и описывается размещение системы на установке. Болометрический датчик был создан на базе пирокристалла ниобата лития, имеющего вид тонкой пластины размерами 1 см x 1 см x 0.1 см. Кристалл припаивается к массивному медному стержню, обеспечивающему теплоотвод. Ток, генерируемый кристаллом при облучении, усиливается специальным предусилителем с сопротивлением обратной связи 1 ГОм. Для уменьшения виброшумов датчик и кабель соединяются кабелем с графитовой смазкой, устраняющей паразитные токи. Сигнал предусилителя регистрируется аналого-цифровым преобразователем и архивизируется в персональном компьютере.

Спектральный диапазон болометра покрывает область от инфракрасного излучения (0.1 эВ) до мягкого рентгеновского излучения (20 кэВ). Спектральная характеристика болометра является плоской. Поглощение длинноволнового излучения определяется тонким графитовым слоем на поверхности датчика. Коротковолновое поглощение определяется слоем ниобата лития толщиной 100 мкм.

На токамаке были установлены широкообзорный датчик, наблюдающий практически весь объем плазмы, и камера-обскура с тремя датчиками, регистрирующими излучение с углом обзора около 1 градуса.

Процедура восстановления сигнала излучения на основе сигнала датчика описана в параграфе 3.2. С помощью эквивалентной схемы датчика показывается, что его реакция на прямоугольный импульс излучения имеет вид дифференцированного сигнала с постоянной времени дифференцирования масштаба десятков мс. Для восстановления используется разностный алгоритм

$$\Phi_i - \Phi_{i-1} = \frac{1}{\chi \cdot p} \left[J_i \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_T} \right) - J_{i-1} \right] \quad (1)$$

Здесь Φ_i – искомое значение мощности в момент времени i , J – ток датчика, τ_T – время дифференцирования, Δt – временной шаг регистрации, а $\chi \cdot p$ – комбинация теплопроводности материала и его пирозлектрических свойств. Экспериментально время дифференцирования определялось с использованием модулированного лазерного излучения. Оно равно 30 мс для использованных датчиков.

В четвертой главе диссертации изложены экспериментальные исследования излучения плазмы.

Параграф 4.1. посвящен описанию базы данных, полученных в результате экспериментов и выбранных для анализа. Параметры плазмы для анализируемых импульсов приведены в Таблице 1.

| № Импульса | I_p кА | V_T Тл. | U_{loop} Вт | T мс | n_{l42} 10^{14} см^{-2} | Vol В. | N_α а.и. | C_{Hirsh} (кВт/В) |
|------------|-------------|--------------|------------------|-----------|----------------------------------------|-------------|--------------------|------------------------|
| 3021 | 165 | 0.65 | 4.5 | 39 | 12.6 | 3.76 | 15 | 30 |
| 3022 | 167 | 0.65 | 5 | 50 | 11.5 | 3.8 | 15 | 29.7 |
| 3023 | 172 | 0.65 | 5 | 53 | 13 | 4 | 12 | 29.8 |
| 3024 | 148 | 0.65 | 5 | 45 | 19.6 | 3.6 | 26 | 30.26 |
| 3025 | 166 | 0.65 | 5 | 36 | 16 | 3.6 | 55 | 28.7 |
| 3026 | 169 | 0.65 | 5 | 37 | 17 | 3.6 | 57 | 30 |
| 3033 | 71 | 0.65 | 5.15 | 21 | 7 | 2.8 | 164 | 33.5 |

Таблица 1. Параметры разрядов и результаты калибровки болометра.

Ток разряда варьировался в диапазоне 71-172 кА. Напряжение на обходе изменялось в пределах 4.5-5.2 В. Длительность импульсов составляла 21-53 мс. Хордовая линейная плотность изменялась от 7 до 19.6 в единицах 10^{14} см^{-2} . Это соответствовало центральной плотности примерно $(1.5-4) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Ионизационный максимум сигнала болометра изменялся в пределах двух раз. В то же время излучение линии N_α изменялось значительно сильнее (до

10 раз). В целом, база данных достаточно представительна для оценки эффективности работы диагностической аппаратуры.

В параграфе 4.2. сопоставляются сигналы болометра и оптической диагностики в линиях H_{α} и СШ. Как оказалось, имеет место временной сдвиг ионизационных максимумов сигналов. При этом, первым наблюдается ионизационный максимум линии H_{α} . Затем с задержкой 1.4 мс следует ионизационный максимум СШ, и еще через 0.9 мс проходит ионизационный максимум болометрического сигнала. Наблюдаемое поведение свидетельствует о том, что сигнал болометра в токамаке Глобус-М формируется ионами с потенциалом ионизации выше, чем СШ.

В параграфе 4.3 приведены результаты исследования флуктуаций излучения. Частотная полоса разработанной аппаратуры позволила наблюдать колебания с частотами до 40 кГц. В этом диапазоне частот лежат и колебания границы плазмы, регистрируемые МГД-зондами. Сравнение сигналов болометра, линий СШ и МГД зондов показало наличие видимых корреляций. Фурье-спектры сигналов имеют аналогичную форму. Данный факт подтверждает возможности разработанной болометрической аппаратуры для изучения колебаний плазмы в токамаках.

Параграф 4.4. содержит описание предложенной в работе методики абсолютной калибровки болометра в процессе экспериментов на токамаке. Обычно, абсолютные измерения представляют значительные трудности из-за плохо контролируемых изменений поглощающих свойств поверхности болометра. Метод абсолютной калибровки основывается на том факте, что на фазе подъема тока в разряде существует достаточно продолжительный период, когда идет ионизация примесей. В момент ионизационного максимума сигнала болометра энергосодержание плазмы и его производная обычно малы, а мощность радиационных потерь плазмы близка к мощности омического нагрева. С учетом изложенного, задача абсолютной калибровки болометра сводится к определению мощности омического нагрева в момент ионизационного максимума на начальной фазе подъема тока плазмы.

Мощность омического нагрева определялась на основе данных о напряжении обхода и расчетных значений индуктивности плазменного шнура. Расчеты индуктивности были выполнены как для вытянутого, так и для круглого сечения шнура. Как оказалось, для начальной стадии приближение круглого сечения дает результаты, близкие к вытянутому варианту. Поэтому можно в дальнейшем это обстоятельство использовать и на других установках. Уровень индуктивной составляющей в мощности нагрева оказался не очень велик в момент ионизационного максимума (на уровне до 30%). Поэтому в первом приближении им можно пренебречь. По результатам калибровки было установлено среднее значение калибровочного коэффициента, равное 30 ± 2 кВт/В.

Калибровка болометра вне камеры проводилась с использованием полупроводникового лазера. Чувствительность составила 1.18 В/Вт. Для однородного распределения мощности излучения по объему токамака данная чувствительность соответствует интегральной чувствительности 37 кВт/В, что близко к экспериментальным данным абсолютной калибровки по данным диагностик токамака.

С использованием абсолютно прокалиброванного болометрического датчика были выполнены измерения эволюции радиационных потерь в течение разряда и оценена их доля во вкладываемую в разряд мощность. Описание этих экспериментов составило содержание параграфа 4.5. Как известно, интегральный баланс энергии в установке определяется уравнением вида

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P_{OH} - \frac{W}{\tau_E} - P_{rad} \quad (2)$$

где W -запас энергии в плазме, P_{OH} -мощность омического нагрева, τ_E -энергетическое время жизни плазмы.

Исследования транспортной составляющей удержания энергии и определение энергетического времени жизни τ_E требуют знания мощности радиационных потерь P_{rad} . Кроме того, соотношение радиационных и транспортных потерь характеризует содержание в плазме примесей, что существенно для оценки чистоты плазмы, создаваемой в токамаке.

Область наблюдения широкообзорного болометра охватывала более 80 % объема установки. По оценкам, даже в случае прижатых к периферии распределений излучения, болометр наблюдал от 75 до 78 % интегрального потока. Данное обстоятельство позволяет с точностью порядка 20 % исключить предположения о тороидальной и полоидальной симметрии излучения, обычно необходимые в случае несферических токамаков. Типичный сигнал болометра приведен на Рис.1.

Излучение плазмы растет со временем после прохода ионизационного пика и, в целом, следует изменениям тока по плазме. В средней части разряда радиационные потери составляют около 30%.

Для различных параметров разряда отношение радиационных потерь к омической мощности в средней части разряда приведено в таблице 2. Как видно, радиационные потери

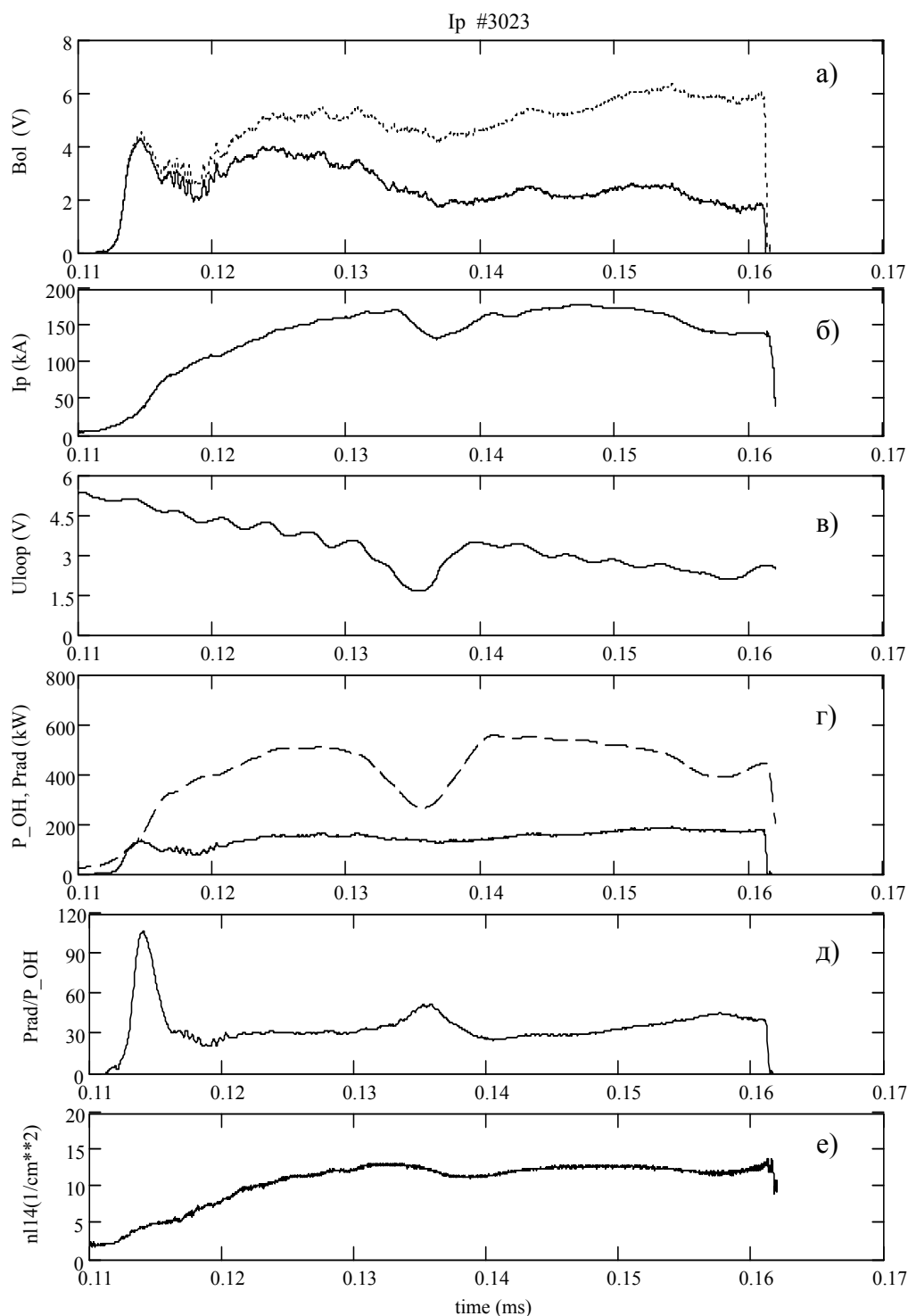


Рис. 1. Набор сигналов диагностик токамака Глобус-М. Импульс № 3023. а-первичный (штриховая линия) и восстановленный (сплошная) сигналы болометра, б- ток, в- напряжение на обходе тора, г-омическая мощность (штриховая) и мощность радиационных потерь (сплошная), д-отношение мощности радиационных потерь к омической, е- линейная плотность плазмы по центральной хорде.

не превышают 40 % от омической мощности. Данный факт свидетельствует о достаточно высокой чистоте плазмы, достигнутой в экспериментах. В то же время, радиационные потери

достаточно велики для того, чтобы существенно влиять на измерения энергетического времени удержания плазмы. При уровне радиационных потерь 40 % энергетическое время, рассчитанное без их учета, окажется заниженным на 60 %.

| № Импульса | I_p кА | U_{loop} В | Vol В. | N142 10^{14} см-2 | P_{rad} кВт | P_{OH} кВт | P_{rad}/P_{OH} % | H_α о.е. | C_{Hirsh} (кВт/В) |
|------------|-------------|-----------------|-----------|------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| 3021 | 152 | 3.23 | 5.56 | 10.6 | 167 | 468 | 35.6 | 15 | 30 |
| 3022 | 155 | 3.32 | 5.85 | 10.5 | 173.8 | 493 | 35.2 | 15 | 29.7 |
| 3023 | 160 | 3.3 | 5.89 | 12.1 | 175.6 | 488.5 | 35.9 | 12 | 29.8 |
| 3024 | 140 | 3.32 | 5.89 | 12.5 | 178 | 451 | 39.5 | 26 | 30.26 |
| 3025 | 154 | 3.31 | 5.89 | 15.4 | 169 | 487 | 34.7 | 55 | 28.7 |
| 3026 | 156 | 3.3 | 5.82 | 16.1 | 175 | 519 | 33.6 | 57 | 30 |
| 3033 | 66 | 4.4 | 2.56 | 5.8 | 85 | 277 | 31 | 164 | 33.5 |

Таблица 2. Значения мощности радиационных потерь, омической мощности, их отношения и калибровочный коэффициент болометра. Значения приведены в момент времени 0.132 секунды (см. рис. 1).

В заключении изложены основные результаты, полученные автором при исследованиях радиационных потерь плазмы токамака «Глобус-М» с использованием пироэлектрического болометра. Описываются также оригинальные разработки экспериментальной техники и методики болометрических измерений. Рассмотрены особенности применения болометров на сферических токамаках.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Проведены первые экспериментальные исследования радиационных потерь плазмы в омических режимах сферического токамака «Глобус-М». Показано, что радиационные потери составляют около 30 % от омической мощности. Зарегистрированный уровень радиационных потерь требует учета данного фактора при определении энергетического времени жизни плазмы.
2. Разработана оригинальная аппаратура для измерений радиационных потерь. Широкообзорный датчик позволил наблюдать до 80 % излучающего объема плазмы, что существенно повышает надежность и достоверность данных об интегральном излучении плазмы.
3. Разработана методика определения абсолютной мощности радиационных потерь, основанная на калибровке по ионизационному пику сигнала излучения болометра, которая проводится в процессе экспериментов на токамаке. Предложенный метод позволяет учесть изменения чувствительности болометра в результате изменения поглощающих свойств поверхности и вести мониторинг чувствительности болометра.

4. Достигнутые высокая чувствительность и помехозащищенность пироэлектрического болометра позволили расширить частотный диапазон до 40 кГц, что сделало возможным применение болометра для изучения МГД-процессов в плазме. Выполненное измерение частоты основной моды МГД-колебаний дало результат в 18,3 кГц, что совпало с данными магнитной диагностики.

Цитируемая литература

1. А. Сайкс, ЖТФ 1999, том 69, вып. 9 р 50.
2. Robinson D.C. // Fusion Energy and Plasma Physics. World Scientific Press, 1987. P.601
3. Sykes A. et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1997. Vol.39. P. 247
4. Collins G.A., Durance G., Hogg G.R., Tendys J., Watterson P.A. // Nuclear Fusion. 1988. Vol.28. P.255.
5. В.К. Гусев, В.Е. Голант, Е.З. Гусаков и др., ЖТФ 1999, том 69, вып. 9 р 58
6. D. V. Orlinsky, G. Magyar, Nuclear Fusion, Vol. 28, No. 4 (1988)
7. N.V.Sakharov, V.K.Gusev, A.V.Dech, et al., Investigation of Equilibrium in Globus-M Ohmic Plasmas, Proceedings of 28th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Funchal, Madeira, 18-22 June 2001

Содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:

1. Б.Фэн, В.Г.Капралов, Б.В.Кутеев, и др. Металлические и пироэлектрические болометры для измерения радиационных потерь горячей плазмы. Сб. докл. 28 Совещ. по физ.плазмы, Звенигород, 19-23.02.2001, с.77.
2. Б.Фэн, П.Г.Габдуллин, В.Г.Капралов, и др. Болометрическая диагностика токамака «Глобус-М». Сб. докл. 29 Конф. по физ.плазмы, Звенигород, 25.02-01.03.2002, с.40
3. Б.Фэн, П.Г.Габдуллин, В.Г.Капралов, и др. Пирометрическая диагностика радиационных потерь сферического токамака «Глобус-М». Материалы 7 конф. «Инженерные проблемы термоядерных реакторов». С.Петербург. 27 – 30.10.2002
4. Б. Фэн, П.Г. Габдуллин, В.Г. Капралов, и др. Наблюдения радиационных потерь в сферическом токамаке ГЛОБУС-М. Письма в ЖТФ (2003, принято к публикации).