

На правах рукописи

Курский Глеб Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ В
СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М МЕТОДОМ
ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2012

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

Научный руководитель Гусев В.К.,
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Афанасьев В. И.,

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Люблин Б.В.,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
ведущий научный сотрудник НИИЭФА им. Ефремова.

Ведущая организация Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки институт общей физики им. А.М. Прохорова
российской академии наук.

Защита состоится «27» декабря 2012 г. в 14:00 на заседании
Диссертационного Совета Д 002.205.03 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф.
Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Автореферат разослан «22» ноября 2012 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Кандидат физико-математических наук

Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы диссертации.

Диссертация посвящена актуальной проблеме термоизоляции плазменного шнура сферического токамака. Работа выполнена на компактном сферическом токамаке Глобус-М [1].

Для увеличения эффективности работы токамака требуется создание хорошей термоизоляции плазменного шнура. Как известно, термоизоляция плазмы в токамаках не подчиняется классическим закономерностям. Классический перенос, вызванный кулоновским столкновением частиц, и представляющий собой череду смещений частиц на величину порядка ларморовского радиуса при столкновении, характеризуется малыми величинами коэффициентов диффузии и теплопроводности. В торе, особенно при низкой частоте столкновений, в механизме переноса тепла и частиц доминирует существенно больший характерный размер – размер «банановой траектории», то есть траектории частицы, запертой в области между сильным магнитным полем на внутреннем обводе и слабым на наружном. Перенос тепла, связанный с запертыми частицами, называется неоклассическим, а характерные коэффициенты переноса превышают классические примерно настолько, насколько ширина банановой орбиты превышает размер ларморовского радиуса. Но и неоклассический перенос не является самым сильным. В некоторых условиях потери тепла в направлении, поперечном магнитному полю, могут вызываться неустойчивостями с малым пространственным масштабом и высокой характерной частотой – плазменной турбулентностью. Турбулентность, возникающая как результат возбуждения микронеустойчивостей, имеет конечный пространственный масштаб и является причиной конвективного транспорта частиц и тепла поперек магнитного поля. Самая плохая термоизоляция характерна для плазмы с высоким уровнем турбулентности, что приводит к малым временам

удержания энергии $\tau_B \sim \frac{a^2}{4D_B}$, где a – малый радиус токамака, $D_B \sim \frac{T_e}{B}$ – коэффициент диффузии Бома, T_e – температура электронов, B – индукция магнитного поля. Такой транспорт тепла называется Бомовским (“Bohm transport”), и именно он определяет «верхнюю» границу аномальности. Времена удержания энергии порядка неоклассических достижимы только для ионного компонента плазмы. Термоизоляция электронов значительно хуже. Времена удержания энергии электронного компонента могут составлять лишь несколько процентов от неоклассических значений.

Несмотря на аномально высокий уровень потерь тепла и частиц, вызываемый плазменной турбулентностью, степень аномальности может значительно отличаться в разных режимах удержания. В 1982 году на установке ASDEX был открыт режим улучшенного удержания – H-мода [2]. В таком режиме на периферии плазмы формируется транспортный барьер для потока тепла и частиц, что приводит к существенному (2-3 раза) увеличению времени жизни энергии по сравнению с обычным режимом, получившим название L-мода. H-мода, или H-режим является классическим примером самоорганизации плазмы, выражающейся в подавлении турбулентного транспорта, главным образом, на периферии плазмы и одновременном улучшении термоизоляции центральных областей. На других установках были открыты и другие режимы с улучшенным удержанием. Все эти режимы характеризовались увеличением энергосодержания по сравнению с обычным режимом (L-модой), что в значительной мере отражалось на форме профилей электронной концентрации, электронной и ионной температур и распределении других параметров плазмы. В пространственной области, где формировался транспортный барьер, обычно наблюдалось увеличение градиента на профиле концентрации и/или температуры соответствующего компонента плазмы.

Исследование процессов переноса в токамаках, необходимость классификации режимов удержания, разработка методов достижения

режимов с улучшенным удержанием выявило ключевую роль диагностик, позволяющих измерять подробные пространственные распределения параметров плазмы. Кроме этого, без знания подробной пространственной вариации профилей плазменных параметров невозможно количественно описывать режимы удержания и добиваться оптимизации равновесия и устойчивости плазменной конфигурации. Параметры термоядерной плазмы предъявляют высокие требования к диагностикам, используемым для проведения измерений. Измерения должны проводиться с хорошим временным и пространственным разрешением, не оказывая воздействия на исследуемую плазму, что существенно сужает спектр применимых методов. Одной из самых надежных диагностик для измерения локальных значений температуры и концентрации электронов является диагностика томсоновского рассеяния основанная на минимуме физических предположений и моделей.

В настоящей работе, с помощью специально разработанной аппаратуры и методики измерений, проводится экспериментальное исследование переноса тепла и частиц в электронном компоненте плазмы на токамаке Глобус-М в сценариях омического нагрева и в сценариях с дополнительным нагревом нейтральным пучком. Ключевую роль в исследовании занимает измерение радиальных распределений температуры и концентрации электронов в плазме токамака методом томсоновского рассеяния с подробным временным и пространственным разрешением. Важной частью работы является модернизация существующего комплекса диагностики томсоновского рассеяния, необходимая для проведения полноценных исследований термоизоляции плазмы в различных режимах работы токамака.

Цели работы.

1. Модернизация аппаратуры комплекса диагностики томсоновского рассеяния для измерения временной вариации профилей электронной температуры и концентрации вдоль большого радиуса токамака

от внутренней до внешней границы плазмы в десяти пространственных точках в мониторинговом режиме.

2. Создание базы данных разрядов с экспериментально измеренными профилями температуры и концентрации электронов, в основных режимах токамака Глобус-М (режим омического нагрева и режим нагрева плазмы методом инжекции нейтрального пучка, L- мода, H – мода, режимы с внутренним транспортным барьером).

3. Разработка транспортной модели токамака, соответствующей существующим возможностям диагностического комплекса Глобус-М для различных режимов работы установки.

4. Исследование процессов переноса в плазме сферического токамака Глобус-М в режиме омического нагрева и при мощном дополнительном нагреве.

Новизна работы.

Впервые для компактного сферического токамака Глобус-М со стенкой, близко расположенной к плазме, разработана регистрирующая аппаратура диагностики томсоновского рассеяния для измерения полных профилей распределения концентрации и температуры электронов и их временных вариаций.

Впервые на компактном сферическом токамаке с высокой плотностью вводимой мощности нагрева ($\sim 3 \text{ МВт/м}^3$) и высокой плотностью плазмы (до 10^{20} м^{-3}) проведено исследование поперечного переноса тепла в электронном канале в L и H режимах.

Впервые на компактном сферическом токамаке наблюдался внутренний транспортный барьер для частиц, и проведено исследование электронного теплопереноса в этом режиме с помощью численных транспортных кодов. Показано, что формирование внутреннего диффузионного барьера происходит в области с отрицательным магнитным

широм, а время его существования ограничено формированием резонансной поверхности $q=1$ в центральной области плазмы.

Достоверность научных результатов. Полученные в ходе работы результаты экспериментально обоснованы. Их достоверность обеспечена многократным повторением измерений, а также сопоставлением данных измерений, выполненных различными диагностическими средствами, и проведением численных расчетов с использованием признанного в научных кругах транспортного кода АСТРА[3]. Полученные данные не противоречат результатам измерений на других сферических токамаках: MAST (Великобритания), NSTX (США).

Личное участие автора. Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. При непосредственном участии автора разработана аппаратура диагностики томсоновского рассеяния и методики проведения калибровок и измерений концентрации и температуры электронов в мониторинговом режиме. При активном участии автора проведены исследования теплопереноса в режиме омического нагрева и режиме дополнительного нагрева нейтральным пучком. Непосредственно автором выполнено численное моделирование, позволившее восстановить пространственно-временные зависимости коэффициента электронной температуропроводности в данных режимах. Автор принимал активное участие в экспериментах на токамаке Глобус-М, осуществляя измерения временной вариации пространственных распределений электронной температуры и концентрации плазмы методом томсоновского рассеяния, результаты которых представлены в диссертации.

Практическая значимость работы. Разработана регистрирующая аппаратура для диагностики рассеянного на плазме излучения многоимпульсного неодимового лазера, основанная на использовании нового поколения лавинных фотодиодов и интерференционных фильтров с высоким контрастом. Применение аппаратуры позволило производить измерение

временной вариации пространственных распределений температуры и концентрации электронов в плазме компактного сферического токамака с близко расположенной стенкой, как со стороны сильного, так и со стороны слабого магнитного поля. Проведенные исследования электронного теплопереноса на токамаке Глобус-М дают возможность создания транспортной модели и рабочих сценариев для проектов сферических токамаков нового поколения - Глобус-М2 и Глобус-М3, разработка которых ведется в настоящее время [4],[5],[6].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработка диагностической аппаратуры томсоновского рассеяния для повышения точности измерения пространственных распределений концентрации и температуры электронов в плазме сферического токамака Глобус-М.

2. Измерения временной динамики пространственных распределений температуры и концентрации электронов вдоль большого радиуса плазмы, как со стороны слабого, так и со стороны сильного магнитного поля. Создание экспериментальной базы данных измерений.

3. Исследование теплопереноса в электронном компоненте плазмы с малым аспектным отношением на основании измерений динамики пространственных распределений температуры и концентрации электронов на квазистационарной стадии разряда.

4. Исследование электронного переноса в условиях, благоприятных для формирования внутренних транспортных барьеров – в режиме отрицательного магнитного шира при дополнительном нагреве нейтральным пучком на стадии роста тока.

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 2007 –2012 гг. и изложены в 14 печатных работах, в том числе в 5 статьях в реферируемых журналах.

Результаты диссертации представлялись международных конференциях: 23rd IAEA Fusion Energy Conference 2010, 38 EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (Strasbourg, 2011), Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (XXXVII, XXXVIII, XXXIX, Звенигород, 2010, 2011, 2012), на совместных симпозиумах, проводимых Калэмским (Culham) научным центром (Великобритания) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе, проводимых Helsinki University of Technology (Финляндия) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на семинарах лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация изложена на 162 страницах, содержит 47 рисунков и 4 таблицы; список литературы содержит 159 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель научная новизна и актуальность исследований.

В главе 1 рассмотрена проблема термоизоляции плазмы в токамаках. Приведен краткий обзор исследований режимов с улучшенным удержанием плазмы (H – режим) и режимов с внутренними транспортными барьерами. На основании приведенного обзора сформулированы задачи, решаемые в рамках данной работы. В разделе 1.1 обсуждается баланс энергии в токамаках и проблема поперечного переноса. Приводится обзор литературы по изучению аномального переноса в плазме токамака. Приводятся основные законы масштабирования описывающие время удержания энергии в зависимости от макроскопических рабочих параметров, позволяющих сравнивать между собой данные с различных установок. В разделе 1.2 рассматриваются режимы работы токамаков в режимах с улучшенным удержанием энергии. Обсуждаются основные механизмы подавления аномального переноса

связанные с переходом разряда в режим улучшенного удержания. Значительная часть раздела посвящена обзору экспериментальных исследований режимов с улучшенным удержанием центральных областей плазменного шнура – внутренних транспортных барьеров. В разделе 1.3 подчеркивается особенность электронного теплопереноса в сферических токамаках по сравнению с токамаками с большим аспектным отношением. Приводится обзор основных физических результатов, посвященных термоизоляции плазмы в установках MAST и NSTX. Приводится краткое описание токамака Глобус-М, формулируются и обосновываются цели диссертационной работы.

В **Главе 2** рассматриваются основы теории методов исследования, используемых в данной работе. Приведен обзор теоретической основы метода диагностики плазмы по томсоновскому рассеянию. Рассмотрены теоретические основы транспортных кодов, применяемых в работе для анализа поперечного переноса тепла и частиц. Проведено обсуждение метода нагрева плазмы с помощью пучка нейтральных частиц и его особенностей на токамаке Глобус-М. В разделе 2.1 рассматриваются теоретические основы метода диагностики плазмы по томсоновскому рассеянию. Рассматриваются области применимости данного метода и основные факторы, влияющие на точность и достоверность измерений. Раздел 2.2 посвящён энергобалансу плазменного шнура и задаче транспортного анализа плазмы. Приводится система уравнений непрерывности для потоков тепла, частиц и полоидального магнитного потока. Обсуждаются методики решений данной системы уравнений методом численных расчетов при разном способе задания граничных условий. В разделе 2.3 рассмотрен метод дополнительного нагрева плазмы нейтральным пучком в условия токамака Глобус-М и основные характеристики процесса термализации надтепловых частиц пучка, с точки зрения классической задачи торможения быстрого иона в плазме в отсутствие неустойчивостей. Обсуждаются методы определения поглощенной мощности пучка в плазме токамака.

Глава 3 посвящена обсуждению параметров разработанной аппаратуры и методики измерений для проведения измерений временной динамики полных профилей температуры и концентрации электронов в условиях компактного токамака Глобус-М. Несмотря на то, что токамак Глобус-М был уже оснащен аппаратурой для томсоновского рассеяния, несовершенство существующей системы не позволяло решить поставленные в работе задачи. В разделе 3.1 подытоживаются основные недостатки существовавшего до 2009 года комплекса томсоновского рассеяния, не позволявшие проводить измерение полных профилей концентрации и температуры в плазме токамака Глобус-М. Приводится описание новой системы регистрации рассеянного излучения разработанной для токамака Глобус-М. В результате модернизации число пространственных точек измерения параметров плазмы было увеличено до десяти, что позволяет в принципе измерять полные профили температуры и концентрации от внутренней до внешней границы плазмы. Для этого были спроектированы и изготовлены 5 новых спектрометров, а существующие 5 были переделаны существенным образом. Была реализована принципиально новая система сбора света, отработаны новые методы калибровки измерительной аппаратуры. Большое внимание уделено увеличению механической надежности и воспроизводимости оптических юстировок. Измерение пространственных распределений электронной температуры и концентрации по большому радиусу производится в экваториальной плоскости. В области проведения измерений формируется перетяжка лазерного луча диаметром 6 мм. Рассеянное на флуктуациях электронов плазмы излучение собирается в линейном угле $1/7$ и проецируется с уменьшением $1:5$ на торцы оптических волокон, расположенных в фокальной плоскости широкоугольного многолинзового ахроматического объектива. Для сбора излучения был разработан малоабберационный светосильный объектив на основе стёкол ТФ10 и СТК19 для работы в угле более 40° и с апертурой 130 мм.

Оптоволоконная линия состоит из 10 упаковок, каждая из которых имеет длину 10 метров и осуществляет передачу собранного излучения на входной объектив отдельного спектрометра. Размер упаковки определяет пространственное разрешение измерений. Выбранному размеру упаковки 4 x 1.5 мм соответствует пространственное разрешение 20 мм вдоль хорды зондирования или ~18 мм поперек магнитных поверхностей. Достаточно важным элементом диагностики, влияющим на её надежность, является система контроля юстировки без нарушения вакуума. Для юстировки используется полупроводниковый непрерывный лазер, с генерацией на длине волны 650 нм, его оптическая ось совмещена с оптической осью диагностического лазера. Юстировка системы осуществляется по свету, рассеянному на мишени, перемещаемой внутри вакуумного объема вдоль хорды зондирования, без нарушения вакуумных условий установки. После юстировки мишень-флажок убирается в специальный патрубок. С помощью оптоволоконной линии осуществляется передача собранного излучения на входные объективы спектрометров, расположенных в специальном помещении, оснащённом системой термостабилизации.

Раздел 3.2 посвящён проблеме регистрации экспериментальных данных, оптическим характеристикам спектрометров, методам интерпретации измеренных сигналов, определению температуры и концентрации и их ошибок. Обсуждается вопрос автоматизации обработки данных. В разделе 3.3 приводится обзор методик, применяемых для калибровки регистрирующей аппаратуры. По сравнению с прежним вариантом диагностики томсоновского рассеяния существенных изменений потребовала процедура калибровки, учитывающая изменения характеристик аппаратуры (пропускания спектральных каналов, коэффициентов усиления ЛФД, характеристик усилителей, и прочих параметров, зависящих от конкретных условий эксперимента).

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию теплопереноса электронным компонентом на токамаке Глобус-М. В разделе 4.1 иллюстрируются возможности диагностики томсоновского рассеяния в плазменном эксперименте. Приводятся результаты измерения пространственно-временной эволюции температуры и концентрации электронов как в омическом разряде токамака, так и при инъекции высокоэнергетичной плазменной струи [7]. Проводятся сравнение данных измерений диагностики томсоновского рассеяния с магнитными и зондовыми диагностиками. В разделе 4.2 описана разработанная транспортная модель плазмы токамака Глобус-М. Приводятся результаты апробации разработанной транспортной модели для исследования теплопереноса в омическом разряде. Показано что перенос тепла в ионном канале соответствует предсказаниям неоклассической теории, значения электронной теплопроводности превышают неоклассические более чем на порядок, а для потока частиц присутствует характерный для Н- режима барьер на периферии плазменного шнура. В разделе 4.3 обсуждаются особенности теплопереноса в омическом режиме. Представлены основные результаты по исследованию удержания плазмы в режиме омического нагрева. Переход в Н - режим переходит при значениях концентрации $\langle n_e \rangle \sim 2.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, что можно считать пороговой плотностью необходимой для перехода. Мощность, вводимая в плазму от омического нагрева, по результатам моделирования составляет $\sim 260\text{-}300$ кВт, что заметно превышает пороговую мощность необходимую для перехода полученную в соответствии с общепринятым скейлингом [8] $P_{thr} = 90$ кВт. При значении средней концентрации $\langle n_e \rangle > 2.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и токе плазмы $I_p \sim 0.2$ МА основной режим удержания плазмы при омическом нагреве – улучшенный, т.е. Н-режим.

В разделе 4.4 приводится результат изучения термоизоляции плазмы при дополнительном нагреве нейтральным пучком для разрядов с разными плотностями и мощностями нагрева. Несмотря на дополнительные 350 кВт мощности дополнительного нагрева поступающих в электронный компонент от

пучка сверх 250 кВт омической мощности, не наблюдается существенных отличий температуры электронов в омическом разряде и разряде с дополнительным нагревом, что следует из сравнения экспериментально измеренных профилей температуры. Расчеты показали, что энергосодержание электронного компонента увеличивается лишь на 15%, по сравнению с омическим разрядом. Анализ радиальных распределений электронной теплопроводности определенным методом численного моделирования показал, что с увеличением вводимой мощности нагрева электронная температуропроводность растет, и термоизоляция плазменного шнура ухудшается. Этот результат согласуется с общепринятыми представлениями о нагреве плазмы в токамаке [8]. Как показали проведенные эксперименты, большую часть квазистационарной фазы разряда как в омическом режиме так и в режиме с дополнительным нагревом плазма находится в H-режиме. Это связано с высокой мощностью нагрева плазмы как в омическом разряде, так и в разряде с нейтральной инжекцией. Кроме того, в разряде с дополнительным нагревом L-H переход происходит очень быстро после включения пучка при среднем значении плотности $\langle n_e \rangle > 1.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, что в 1.5 раза ниже чем для разряда с омическим нагревом.

Раздел 4.5 посвящен исследованию процессов переноса электронного компонента плазмы в режиме с ранней инжекцией пучка на стадии роста тока. В таком режиме запас МГД устойчивости на оси шнура превышает единицу ($q(0) > 1$) и в значительной области плазмы создается немонотонный профиль $q(r)$, характеризующийся отрицательным или слабым магнитным широм. Численные расчеты, проведенные на основании сделанных измерений временной вариации пространственных распределений, показали наличие внутренних транспортных барьеров для потоков тепла и частиц и позволили проследить их временную эволюцию, области формирования и причину разрушения. Моделирование показало наличие областей с пониженными коэффициентами переноса тепла и частиц. На профиле концентрации наблюдается область пониженного переноса

на границе плазмы или периферийный диффузионный барьер, типичный для режима H-моды. Кроме этого существует еще одна область пониженного переноса частиц, расположенная глубоко внутри плазменного шнура (внутренний диффузионный барьер). На профиле температуры проявляется только один барьер, расположенный в области нормализованного малого радиуса ~ 0.7 , периферийный же барьер отсутствует. Как показал анализ расчетных и экспериментальных данных, максимум градиента температуры электронов наблюдается в области слабого положительного магнитного шира, а максимум градиента концентрации в зоне отрицательного магнитного шира, вблизи его минимального значения. Оба внутренних транспортных барьера связаны с существованием режима удержания, который называют режимом слабого магнитного шира [8], время существования которого ограничено формированием в плазме магнитной поверхности $q=1$.

В заключении сформулированы основные физические результаты данной диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведена разработка аппаратуры диагностики томсоновского рассеяния на компактном сферическом токамаке Глобус-М. В результате модернизации число пространственных точек было увеличено вдвое (с 5 до 10), что позволило измерять радиальное пространственное распределение температуры и концентрации электронов от внутренней до внешней границы плазменного шнура, в том числе вблизи сепаратрисы в различных условиях разряда.

2. Разработана новая методика обработки данных и программное обеспечение для автоматической обработки сигналов рассеяния, с помощью которого решена задача проведения измерений в мониторинговом режиме, а также создания базы данных временных вариаций профилей температуры и

концентрации электронов в разрядах токамака Глобус-М, содержащей более 2500 разрядов.

3. Создана расчетная модель плазмы токамака Глобус-М, которая апробирована как в эксперименте с омическим нагревом плазмы, так и в режиме дополнительного нагрева плазмы нейтральным пучком.

4. Впервые проведено исследование теплопереноса в магнитной конфигурации плазмы с малым аспектным отношением сложной формы, как в режимах омического нагрева, так и при инжекции в плазму нейтрального пучка с рекордно высокой мощностью на единицу объема - до 2.5 МВт/м^3 . Численные расчеты с помощью транспортных кодов АСТРА, NCLASS [9], проведенные на основании экспериментальных данных, показали, что перенос тепла в ионном канале соответствует предсказаниям неоклассической теории, а электронный транспорт тепла аномален. При этом расчетные значения электронной температуропроводности превосходят неоклассические более чем на порядок. Время жизни энергии плазмы при этом удовлетворительно согласуется с оценками, проведенными по скейлингу IPB98(y,2) [8].

5. Проведенные эксперименты и численные расчеты показали, что в компактном сферическом токамаке, при определенных условиях, могут формироваться внутренние транспортные барьеры для потоков частиц и тепла. Такими условиями являются наличие слабого магнитного шира в широкой области плазмы, а также отсутствие в плазменном шнуре резонансной магнитной поверхности $q=1$. В работе были изучены их временная эволюция, область формирования и причина разрушения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты работы были представлены в 9 докладах:

1. Курские Г.С., Гусев В.К., Толстяков С.Ю., и др. «Особенности поведения электронного компонента плазмы токамака Глобус-М в омическом режиме и в режиме с дополнительным нагревом нейтральным пучком», В сб.

XXXIX Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 6 – 10 февраля 2012 г., с. 68, Москва, 2012.

2. Курские Г.С., Толстяков С.Ю., Гусев В.К., и др. «Результаты транспортного анализа плазмы на токамаке Глобус-М на основании данных диагностики томсоновского рассеяния», В сб. XXXVIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 14 – 18 февраля 2011 г., с. 82, Москва, 2011.

3. S.Yu. Tolstyakov, G.S.Kurskiev, V.K.Gusev, et. al. “Study of electron component dynamics during neutral beam injection into spherical tokamak Globus-M” Proc. of 38th EPS Conference on Plasma Phys. Strasbourg, June 27 – July 1, 2011 ECA Vol.35G, P-5.052 (2011).

4. Курские Г.С., Толстяков С.Ю. Березуцкий А.А., и др. «Прогресс в исследовании кинетических параметров плазмы на токамаке Глобус-М методом томсоновского рассеяния и перспективы развития диагностики», В сб. XXXVII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 8 – 12 февраля 2010 г., с. 81, Москва, 2010.

5. G.S. Kurskiev, S.Yu. Tolstyakov, V.K. Gusev, M.M. et. al. «Investigation of the NBI heated plasma on the Globus-M tokamak with the use of Thomson scattering diagnostics» Proc. of 4th IWSSPP, Bulgaria, 5 – 9 July (2010).

6. V.K. Gusev, S.E. Aleksandrov, R.M. Aminov, ... G.S. Kurskiev, et. al. «Investigation of Beam- and Wave- Plasma Interaction in the Globus-M Spherical Tokamak», Proc. of 23rd IAEA Fusion Energy Conf., Daejon, Republic of Korea, 11-16 October 2010, CN-180, EXW/P7-08

7. А.В. Воронин, В.К. Гусев, Я.А. Герасименко, Г.С. Курские, и др. «Генерация и инжекция в токамак высокоэнергичных струй плотной плазмы, свободной от примесей», В сб. XXXVIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 14 – 18 февраля 2011 г., с. 64, Москва, 2011.

8. В.К. Гусев, А.Е. Иванов, А.Д. Мельник, Г.С. Курские, и др. «Влияние параметров разряда на эффективность метода нейтральной инжекции в

сферическом токамаке Глобус-М», В сб. XXXVIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 14 – 18 февраля 2011 г., с. 102, Москва, 2011.

9. Гусев В.К., Воронин А.В., Дьяченко, ... Курские Г.С., и др. «Воздействие пучков частиц и ЭМ волн на плазму сферического токамака Глобус-М при низком и увеличенном магнитном поле», В сб. Международного семинара «Инновационный проект создания казахского материаловедческого токамака КТМ. Научные исследования и международное сотрудничество», 5 – 7 сентября 2011 г., Назарбаев Университет, Республика Казахстан, 176 с., стр. 65 – 66

и опубликованы в 5 статьях в реферируемых изданиях:

1. Г.С. Курские, С.Ю. Толстяков, А.А. Березуцкий, и др. «Модернизация диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М» В сб. Вопросы атомной науки и техники, 2012, вып. 2, с.81
2. Г.С. Курские, В.К. Гусев, С.Ю. Толстяков, и др. «Формирование внутренних транспортных барьеров в токамаке Глобус-М в режиме с ранним включением нейтрального пучка» Письма в ЖТФ, , 2011, том 37, вып. 23, с. 82 – 90.
3. V.K. Gusev, R.M. Aminov, A.A. Berezutskiy, ... G.S. Kurskiev, et.al. «Investigation of beam– and wave–plasma interactions in spherical tokamak Globus-M» Nucl. Fusion 51 (2011) 103019 (12pp).
4. Ю.В. Петров, М.И. Патров, В.К. Гусев, ... Г.С. Курские и др. «Экспериментальное исследование тороидальных альфвеновских мод на сферическом токамаке Глобус-М» Физика плазмы, 2011, т.37, №12, с. 1075-1080.
5. Буланин В.В., Варфоломеев В.И., Гусев ... Курские Г.С., и др. «Наблюдение филаментов на токамаке Глобус-М методом доплеровской рефлектометрии» 2011, Письма ЖТФ, т.37, 7 страницы: 103-110.

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1]. Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др., ЖТФ, 1999, т. 69, № 9, 58-62.
- [2]. F. Wagner, G. Becker, K. Behringer, et al., Regime of Improved Confinement and High Beta in Neutral-Beam-Heated Divertor Discharges of the ASDEX Tokamak //Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1408
- [3]. G. V. Pereverzev, P. N. Yushmanov, A. Yu. Dnestrovskii, et.al., ASTRA, An Automatic System for Transport Analysis in a Tokamak, Report IPP 5/42, August 1991
- [4]. V.K. Gusev, V.B. Minaev, V.V. Dyachenko, et. al. “Globus-M modernization and plasma parameter promotion in the basic plasma heating and CD scenarios”// Proc. of 38th EPS Conference on Plasma Phys. Strasbourg, June 27 – July 1, 2011 ECA Vol.35G, P-4.094 (2011).
- [5]. V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, et. al., Magnetic System for the Upgraded Spherical Tokamak Globus-M2 //24th IAEA Fusion Energy Conference 8-13 October 2012 ICC/P1-01
- [6]. V.K. Gusev, N.N. Bakharev, A.A. Berezutskii, et. al. Globus-M Results Toward Compact Spherical Tokamak with enhanced Parameters Globus-M2 //24th IAEA Fusion Energy Conference 8-13 October 2012 EX/8-3
- [7]. V.K. Gusev, R.M. Aminov, A.A. Berezutskiy, ... G.S. Kurskiy, et.al. «Investigation of beam– and wave–plasma interactions in spherical tokamak Globus-M» Nucl. Fusion 51 (2011) 103019 (12pp).
- [8]. Progress in the ITER Physics Basis. //Nucl. Fusion., 2007, V47.
- [9]. W. A. Houlberg, K. C. Shaing, S. P. Hirshman, and M. C. Zarnstorff, Bootstrap current and neoclassical transport in tokamaks of arbitrary collisionality and aspect ratio // Phys. Plasmas, 1997, 4 3230