

На правах рукописи

**Тукачинский Александр Симонович**

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ЭНЕРГОБАЛАНС В РЕЖИМАХ С  
УЛУЧШЕННЫМ УДЕРЖАНИЕМ ПРИ ОМИЧЕСКОМ  
НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2008

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Лебедев С.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Кутеев Б.В.  
кандидат физико-математических наук,  
Капралов В.Г.

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится 13 ноября 2008 г. в 14 часов на заседании  
Диссертационного Совета Д 002.205.03 при Учреждении Российской  
академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской  
академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан «08» октября 2008 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук \_\_\_\_\_ Красильщиков А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации**

Одним из перспективных альтернативных источников энергии является реактор на основе управляемого термоядерного синтеза (УТС), в котором выделяется значительное количество энергии при незначительном количестве радиоактивных отходов. Наиболее существенный прогресс в осуществлении идеи УТС достигнут на установках типа «токамак» с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы. Для достижения параметров зажигания термоядерной реакции в экспериментальном реакторе ИТЭР (ITER) предполагается использовать режимы с так называемым улучшенным удержанием, в которых происходит формирование транспортных барьеров – областей пониженного переноса тепла и вещества. Такие барьеры могут образовываться как на периферии плазмы – Н-режим, так и в центральных областях – внутренний транспортный барьер (ITB – Internal Transport Barrier). Несмотря на существенный прогресс в развитии теории, физика процессов переноса в токамаке и, в частности, физика образования транспортных барьеров в настоящее время остается не вполне ясной. В большинстве случаев расчеты сценариев работы реактора опираются на эмпирически найденные законы масштабирования (скейлинги), а не на аналитические формулы, выведенные из физических законов. В отсутствие универсальной теории актуальным оказывается экспериментальное исследование механизмов переноса энергии и частиц в различных режимах работы токамака.

В начале 1990-х годов на токамаке ТУМАН-3 в условиях омического нагрева был обнаружен переход в режим с улучшенным удержанием, по ряду признаков напоминавший Н-режим, наблюдавшийся ранее на ряде зарубежных установок в условиях дополнительного нагрева. К моменту начала исследований этого режима, получившего впоследствии название «омическая Н-мода», не были понятно, является ли он частным случаем Н-режима, или представляет собой некое новое явление, обусловленное другими физическими механизмами. Эксперименты и методики, описанные в данной диссертации, позволили ответить на этот вопрос.

Расширение диапазона рабочих параметров токамака ТУМАН-3 (после модернизации получившего название ТУМАН-3М) дало возможность получить омические режимы с внутренним транспортным барьером в электронной компоненте. Режимы с ITB наблюдались ранее на ряде установок в условиях дополнительного нагрева плазмы. При этом было обнаружено, что ITB обычно формируются в областях плазмы с отрицательным или близким к

нулю магнитным широм  $s = \frac{r}{q} \frac{\partial q}{\partial r}$

( $q$  – коэффициент запаса устойчивости,  $r$  – малый радиус магнитной поверхности). Для создания подобных магнитных конфигураций обычно используются сложные сценарии разряда, в которых применяется мощный дополнительный нагрев на стадии подъема тока по плазме. С точки зрения исследования механизмов формирования ИТВ, использование сценариев с дополнительным нагревом может привести к появлению ряда факторов (например, вложенная мощность, ее локализация, соотношение температуры электронов и ионов, переданный плазме импульс), затрудняющих интерпретацию экспериментальных результатов. Поэтому интерес представляет как сама возможность, так и причины формирования ИТВ в условиях чисто омического нагрева, когда передача момента импульса извне отсутствует, а барьер образуется без применения средств дополнительного нагрева.

#### **Цели работы**

Перед автором данной диссертационной работы стояла задача исследования электронного энергобаланса в различных режимах с улучшенным удержанием, полученных на установках ТУМАН-3 и ТУМАН-3М в условиях омического нагрева. В рамках этого исследования требовалось:

1. Выполнить измерения профилей электронной температуры методом томсоновского рассеяния в различных режимах работы. Для этого требовалась модернизация лазерного диагностического комплекса, направленная на повышение точности измерений.
2. Исследовать особенности переноса тепла в электронной компоненте плазмы в различных режимах. В рамках этой задачи требовалось, в частности, восстановить пространственно-временные зависимости коэффициента электронной температуропроводности и плотности тока по плазме, а также оценить роль конвекции в теплопереносе.
3. Сравнить режимы с улучшенным удержанием, полученные на установках ТУМАН-3 и ТУМАН-3М в условиях омического нагрева, с аналогичными режимами, наблюдавшимися на других токамаках в условиях дополнительного нагрева; выявить общие и отличительные черты этих режимов.
4. Исследовать возможность формирования внутренних транспортных барьеров в плазме токамака в отсутствие дополнительного нагрева.

#### **Новизна работы**

Впервые исследованы особенности формирования Н-режима в омических разрядах в токамаке с лимитерной магнитной конфигурацией и круглым сечением. Установлено, что режим омической Н-моды обладает

основными свойствами Н-режимов, наблюдающихся в условиях дополнительного нагрева на установках с дивертором и вытянутым сечением. Обнаружено, что, помимо обычного для Н-режима формирования периферийного барьера для транспорта частиц, омический Н-режим характеризуется также заметным снижением переноса энергии в градиентной области плазмы. Впервые показано, что этот эффект в основном обусловлен возникновением конвективных потоков, направленных внутрь плазмы. В омических разрядах впервые была обнаружена задержка в формировании пьедестала на профиле электронной температуры при переходе в Н-режим. Это наблюдение позволило заключить, что в Н-режиме не обязательно происходит быстрый прогрев периферии, и электронная температура на краю не является решающим фактором, приводящим к L-Н-переходу. В дальнейшем этот вывод нашел подтверждение и на других установках.

Впервые в омических разрядах обнаружен режим с двумя транспортными барьерами: внутренним (ITB) и периферийным, и проведен анализ теплопереноса в этом режиме. Впервые в омическом разряде обнаружен и исследован режим с внутренним транспортным барьером, формирующемся на начальной стадии разряда. Показано, что, так же как и при дополнительном нагреве, этот барьер образуется в области с низкими абсолютными значениями магнитного шира.

#### **Достоверность научных результатов**

Полученные в ходе работы результаты экспериментально обоснованы. Их достоверность обеспечена многократным повторением измерений, сопоставлением данных измерений, выполненных различными диагностическими средствами и проведением численных расчетов с использованием признанного в научных кругах транспортного кода АСТРА.

#### **Практическая значимость работы**

Разработана методика согласования элементов лазерной многопроходной системы внутриврезонаторного зондирования, позволившая в условиях относительно высокой расходимости излучения лазера существенно увеличить эффективную энергию в зондируемом объеме. Описанная методика успешно применена при модернизации диагностического комплекса, используемого на установке ТУМАН-3М для измерений электронной температуры плазмы методом томсоновского рассеяния, и может быть применена в других экспериментах для повышения чувствительности метода. Исследования режима омической Н-моды, представленные в данной работе, позволили сформулировать выводы о том, что электронная температура на периферии не является решающим фактором, приводящим к переходу в Н-режим. Впоследствии эти результаты были использованы на установке ТУМАН-3М при разработке методов перевода плазмы в Н-режим в условиях омического разряда. Исследование особенностей омических режимов с

внутренними транспортными барьерами и механизмов формирования этих барьеров позволило предложить методы инициирования внутреннего транспортного барьера в условиях омического разряда. Это открывает возможность получения и исследования режимов с ИТВ без использования дорогостоящих комплексов дополнительного нагрева плазмы. Помимо этого, использование предложенных методов позволяет разработать сценарии более эффективного дополнительного нагрева плазмы путем формирования ИТВ до включения нагревного комплекса.

#### **Личное участие автора**

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Лично автором проведены исследования теплопереноса в режимах омическая Н-мода, режимах с внутренними транспортными барьерами, формирующимися на стационарной и на начальной фазе омического разряда. Непосредственно автором выполнено численное моделирование, позволившее восстановить пространственно-временные зависимости коэффициента электронной теплопроводности и плотности тока по плазме в упомянутых выше режимах.

Автор осуществлял измерения электронной температуры плазмы методом томсоновского рассеяния, результаты которых представлены в данной диссертации. Автор непосредственно участвовал в работах по модернизации многопроходной системы лазерного зондирования плазмы и проводил экспериментальное исследование свойств оптических резонаторов различной конфигурации в составе многопроходной системы зондирования.

Автору принадлежит ряд наблюдений и выводов, важных для понимания механизмов подавления теплопереноса в режимах с улучшенным удержанием, рассмотренных в данной работе. В частности, автором были обнаружены и исследованы экспериментальные факты, позволившие заключить, что формирование периферийного пьедестала на профиле электронной температуры не является причиной перехода в омическую Н-моду. На основании проведенного автором численного моделирования сделан вывод о том, что подавление транспорта тепла в градиентной области плазмы токамака ТУМАН-3 при переходе в омическую Н-моду обусловлено, в основном, возникновением конвективных потоков, направленных внутрь плазмы.

Автором также обнаружены и исследованы явления формирования внутренних транспортных барьеров в условиях омического нагрева на установке ТУМАН-3М. Образование ИТВ наблюдалось как на стационарной стадии разряда при больших токах по плазме  $I_p$ , так и на начальной стадии разряда при быстром подъеме  $I_p$ . На основании проведенного автором численного моделирования им было показано, что в первом случае ИТВ

формируется вблизи поверхности  $q=1$ . Во втором случае автором была обнаружена связь между образованием/разрушением этого барьера и эволюцией профиля плотности тока. Численное моделирование, проведенное автором, показало, что вероятной причиной образования барьера на начальной стадии разряда является уменьшение (до значений, близких к нулю) величины магнитного шира, вызванное быстрым подъемом  $I_p$ .

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Модернизация многопроходной системы лазерного зондирования плазмы, позволившая увеличить эффективную энергию на 30% и повысить точность измерений электронной температуры методом томсоновского рассеяния.
2. Исследование особенностей электронного теплопереноса в режиме «омическая Н-мода». Помимо типичного для Н-моды формирования периферийного барьера обнаружено уменьшение переноса энергии в градиентной области, обусловленное, в основном, возникновением конвективного потока, направленного внутрь плазмы.
3. Обнаружение задержки формирования пьедестала на профиле электронной температуры при переходе в омическую Н-моду. Вывод о том, что электронная температура на периферии не является решающим фактором, приводящим к переходу в Н-режим.
4. Экспериментальное наблюдение и анализ возможных причин формирования внутреннего транспортного барьера, образующегося в стационарной стадии омической Н-моды на токамаке ТУМАН-3М.
5. Обнаружение внутреннего транспортного барьера на начальной стадии омического разряда в токамаке ТУМАН-3М. Исследование электронного теплопереноса в этом режиме.
6. Анализ возможных механизмов формирования внутреннего транспортного барьера на начальной стадии омического разряда. Обнаружение связи между образованием/разрушением этого барьера и эволюцией профиля плотности тока.

#### **Апробация работы и публикации**

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 1990 – 2005 гг. и изложены в 26 печатных работах, в т.ч. в 11 статьях в реферируемых журналах. Результаты диссертации неоднократно представлялись на ежегодной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС и на семинарах лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им А.Ф.Иоффе РАН (Санкт-Петербург), представлялись автором на международных конференциях: 14-th International School on Plasma Phys. “Piero Caldirola” on Local Transport Studies in Fus. Plasmas (Varenna, 1993), 29th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion (Montreux, ECA, 2002), 45th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of American Physical Society

(Albuquerque, 2003), ИТРА (International Tokamak Physics Activities) Meetings (С-Петербург, 2005), на совместных симпозиумах, проводимых Калэмским (Culham) научным центром и ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 176 страниц печатного текста, в том числе: 47 рисунков, 2 таблицы и список литературы, состоящий из 146 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** кратко изложено место данного исследования в проблеме решения задачи создания реактора, использующего управляемую реакцию термоядерного синтеза. Отмечена необходимость исследования режимов с улучшенным удержанием энергии для снижения размеров и стоимости будущего реактора.

**Первая глава**, озаглавленная «Исследования переноса энергии в токамаках», является обзором литературы по теме работы. Она состоит из четырех разделов. В разделе 1.1 обсуждается система транспортных уравнений и вводится понятие транспортных коэффициентов. Второй раздел первой главы посвящен проблеме определения коэффициентов переноса. Отмечено, что в настоящее время отсутствует универсальная теория, адекватно описывающая транспортные процессы в плазме. В этих условиях важную роль играют экспериментальные исследования, направленные на непосредственное определение транспортных коэффициентов и на построение эмпирических законов (скейлингов), позволяющих количественно оценивать параметры удержания в широком диапазоне экспериментальных условий. В этом же разделе приведен ряд скейлингов для времени удержания энергии  $\tau_E$ , построенных на основе анализа различных баз данных. Раздел 1.3 посвящен экспериментальным методам исследования электронного энергобаланса в плазме. В этом разделе показана возможность измерения времени удержания энергии и запасенной энергии с помощью электромагнитных диагностик и рассмотрены различные методы экспериментального определения локальных коэффициентов электронной температуропроводности.

В четвертом разделе первой главы проведен сравнительный анализ основных режимов с улучшенным удержанием, рассматриваемых в качестве перспективных для работы термоядерного токамака-реактора. Представлены результаты экспериментальных исследований и основные теоретические представления о возможных физических механизмах, приводящих к улучшению удержания в этих режимах. Данный раздел разбит на три параграфа. В параграфе 1.4.1 рассматриваются перспективы применения режимов с периферийными (H-режим) и внутренними (ITB – Internal Transport Barrier) транспортными барьерами при работе реактора ITER.

Параграф 1.4.2 посвящен рассмотрению особенностей Н-режима. Представлены основные отличительные признаки этого режима. Рассмотрена модель, объясняющая переход в Н-режим подавлением турбулентного переноса за счет декорреляции турбулентности градиентом (широм) скорости  $E_r \times V$  вращения плазмы в скрещенных радиальном электрическом  $E_r$  и магнитном  $B$  полях. В параграфе 1.4.3 рассматриваются особенности режимов с ИТВ. Отмечено, что универсальная теоретическая модель, адекватно описывающая условия и механизмы формирования ИТВ в настоящее время отсутствует. В экспериментах, выполненных к настоящему времени, ИТВ обычно формируются в областях плазмы с отрицательным или близким к нулю магнитным широм. Однако это условие в ряде случаев является недостаточными для образования барьера. Факторами, способствующими формированию ИТВ, являются сильно неоднородное вращение плазмы и присутствие рациональных (с малыми собственными числами  $m$  и  $n$ ) или целочисленных магнитных поверхностей в областях с отрицательным или близким к нулю магнитным широм.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена описанию экспериментальной установки и методов исследования электронного энергобаланса на токамаке ТУМАН-3М (до модернизации – ТУМАН-3). Она состоит из четырех разделов. Первый из них посвящен описанию токамака и особенностям его конструкции. Во втором разделе данной главы описаны основные диагностики, используемые для анализа энергобаланса плазмы. В третьем разделе второй главы рассмотрены физические основы измерений температуры и концентрации плазмы методом томсоновского рассеяния (параграф 2.3.1) и приведены основные особенности реализации этого метода на токамаке ТУМАН-3М (параграф 2.3.2). Используемый в составе диагностического комплекса рубиновый лазер ( $\lambda_0=694,3$  нм) работает в режиме модуляции добротности. На установке реализована схема внутриврезонаторного многопроходного зондирования, которая позволяет во много раз увеличить эффективную энергию зондирования плазмы и, тем самым, существенно повысить чувствительность метода. В диссертационной работе рассмотрены основные принципы согласования элементов лазера с многопроходной системой и изложена методика этого согласования. Применение предложенной методики позволило проводить измерения электронной температуры с точностью 7 – 15% при средней концентрации плазмы около  $2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

В разделе 2.4 описывается методика, применявшаяся в диссертационной работе для восстановления коэффициента электронной температуропроводности по данным экспериментальных измерений профилей электронной температуры  $T_e(r,t)$  и концентрации  $n(r,t)$ . Для этого решалась обратная задача теплопроводности, в которой источник вкладываемой в

плазму омической мощности рассчитывался путем решения уравнения диффузии тока. Вычисления проводились с помощью кода АСТРА.

**Третья глава** диссертации озаглавлена «Перенос энергии в омической Н-моды на токамаках ТУМАН-3 и ТУМАН-3М» и состоит из трех разделов. В первом из них приводятся экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что обнаруженный в омическом разряде режим с улучшенным удержанием, названный «омическая Н-мода», является частным случаем Н-режима, наблюдающегося на других установках в условиях дополнительного нагрева. Общими свойствами омической Н-моды и Н-режима являются: существенное (более чем в 2 раза) увеличение времени удержания энергии  $\tau_E$  и частиц  $\tau_p$ ; быстрый рост концентрации вблизи периферии, свидетельствующий о формировании периферийного транспортного барьера, уменьшение интенсивности турбулентности вблизи периферии плазмы.

Раздел 3.2 посвящен особенностям переноса энергии в электронной компоненте при переходе плазмы в омическую Н-моду. Обнаружено, что, помимо обычного для Н-режима формирования периферийного барьера для переноса частиц, омическая Н-мода характеризуется также заметным снижением переноса энергии в градиентной области плазмы. Показано, что этот эффект обусловлен, в значительной степени, возникновением конвективных потоков, направленных внутрь плазмы. Другой особенностью исследуемого режима является задержка формирования пьедестала на профиле электронной температуры. Это наблюдение позволило заключить, что электронная температура на краю не является решающим фактором, приводящим к переходу в Н-режим. В дальнейшем этот вывод нашел подтверждение и на других установках.

Раздел 3.3 посвящен исследованию параметрических зависимостей времени удержания энергии  $\tau_E$  в омической Н-моды. Задача исследования параметрических зависимостей потребовала расширения диапазона рабочих параметров установки ТУМАН-3М. Для этого стенки вакуумной камеры были покрыты соединениями бора (боронизация). Особенности омической Н-моды в боронизованной камере посвящен параграф 3.3.1. Боронизация стенок вакуумной камеры позволила существенно уменьшить поступление примесей в плазму и расширить диапазон доступных для исследования плазменных токов и концентраций. Более чем вдвое увеличилось и время удержания энергии  $\tau_E$ , достигнув рекордных для установки ТУМАН-3 значений 30 мс. Благодаря расширению диапазона рабочих параметров установки, был выявлен ряд закономерностей, важных для исследования особенностей удержания энергии в омической Н-моды, и проведено сопоставление исследуемого режима с основными режимами удержания, известными к тому времени. Результаты этих исследований представлены в параграфе 3.3.2.

Показано, что омическая Н-мода отличается от обыкновенного режима омического нагрева сильной зависимостью  $\tau_E$  от тока по плазме и вкладываемой мощности, а также слабой зависимостью  $\tau_E$  от концентрации. Отмеченные особенности характерны также для Н-режимов с дополнительным нагревом, что позволяет предположить наличие общего физического механизма, приводящего к подавлению переноса в Н-режиме и не зависящего от способа нагрева, размера и магнитной конфигурации установки. Было обнаружено, что в омической Н-моде зависимость времени удержания энергии  $\tau_E$  от тока по плазме  $I_p$  оказывается более сильной, чем предсказывает большинство скейлингов для Н-режима. При увеличении тока по плазме до 150 кА величина  $\tau_E$  в омической Н-моде существенно превышает предсказания этих скейлингов (в частности, скейлингов ITERH.DB3, PB98(y,2)). Причиной отмеченных особенностей омической Н-моды при больших величинах  $I_p$ , скорее всего, является формирование второго (внутреннего) транспортного барьера, обсуждаемого в последней главе диссертационной работы.

В четвертой главе диссертации приведены результаты исследований особенностей баланса энергии в электронной компоненте в режимах с внутренними транспортными барьерами, обнаруженных на токамаке ТУМАН-3М. Раздел 4.1 посвящен изучению омической Н-моды с внутренним транспортным барьером (ITB). В параграфе 4.1.1 приведены экспериментальные факты, свидетельствующие о формировании ITB при токе по плазме  $I_p \sim 150 - 160$  кА. Так на профилях электронной температуры  $T_e$  наблюдаются две характерные области с большими значениями градиента электронной температуры. Одна из них расположена вблизи границы плазмы ( $r > 20$  см) и соответствует периферийному барьеру, характерному для Н-моды. Вторая – находится во внутренней области плазмы:  $8 \text{ см} < r < 16 \text{ см}$ , где также наблюдается и увеличение градиента концентрации. В разделе 4.1.2 проводится транспортный анализ режима омической Н-моды с внутренним транспортным барьером. Показано, что после формирования ITB в области  $0.4a < r < 0.7a$  эффективный коэффициент температуропроводности  $\chi_e^{\text{eff}}$  уменьшается на порядок (до величины порядка  $1-2 \text{ м}^2/\text{с}$ ). Коэффициент  $\chi_e^{\text{eff}}$  определяется в предположении, что уравнение температуропроводности для электронной компоненты плазмы имеет вид уравнения диффузии:

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (nT_e) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \rho \left( -n\chi_e^{\text{eff}} \frac{\partial T_e}{\partial \rho} \right) \right\} = P_{in}, \quad \text{где } P_{in} \text{ – плотность}$$

вкладываемой в электронную компоненту мощности. Посредством моделирования процесса диффузии тока, показано, что внутренний транспортный барьер формируется в условиях существенно положительного магнитного шира  $s$  вблизи поверхности  $q=1$ .

Раздел 4.2 посвящен исследованиям внутреннего транспортного барьера, образующегося на начальной стадии омического разряда установки ТУМАН-3М непосредственно после прекращения подъема тока по плазме. В параграфе 4.2.1 представлена совокупность экспериментальных фактов, свидетельствующих о формировании ИТВ. Существование ИТВ на начальной стадии омического разряда подтверждается измерениями эволюции профилей электронной температуры  $T_e$  методом томсоновского рассеяния (рис.1). Особенностью поведения  $T_e$  непосредственно после прекращения подъема тока по плазме является существенное (в 1.5 раза) увеличение температуры в центральной части плазмы, происходящее во временном промежутке 32 – 43 мс (см. рис.1) и сопровождающееся увеличением  $\nabla T_e$  в области 6 – 10 см, которое очевидно является следствием формирования ИТВ. Происходящее впоследствии и длящееся приблизительно 2–3 мс уменьшение  $T_e(0)$  было интерпретировано как разрушение этого транспортного барьера. Особенностью исследуемого режима также является то, что описанная выше

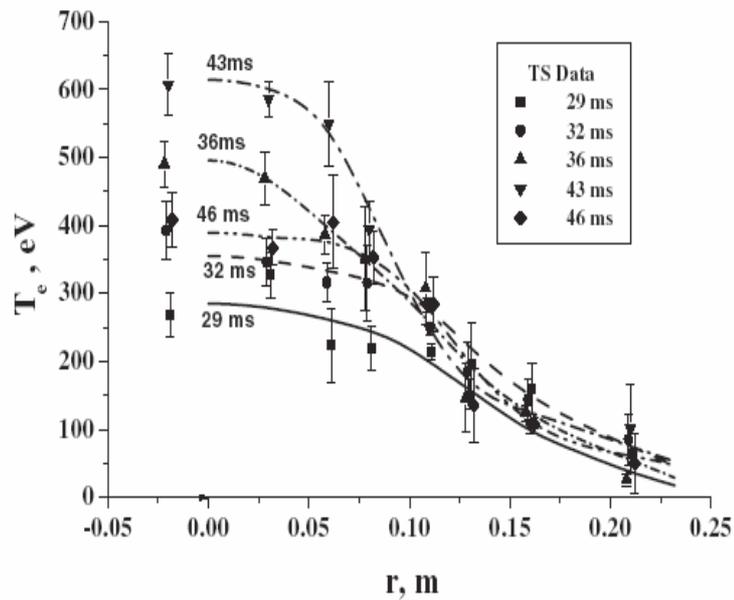


Рис. 1. Эволюция профилей электронной температуры в омическом разряде с внутренним транспортным барьером, образующимся на начальной стадии омического разряда

эволюция  $T_e$  происходит на фоне интенсивных МГД колебаний, наблюдаемых на магнитных зондах, рентгеновских датчиках и сигналах СВЧ-интерферометра. В параграфе 4.2.2 представлены результаты численного моделирования режима с ИТВ в начальной стадии омического разряда. Путем решения обратной задачи теплопроводности показано, что на временном отрезке 15 – 22 мс с момента начала подъема тока по плазме в районе  $r = 6 - 10$  см формируется область пониженного теплопереноса, интерпретируемая как внутренний транспортный барьер. Моделирование процесса диффузии тока позволило заключить, что величина магнитного шира  $s$  внутри области  $r < 8$  см близка к нулю ( $s < 0.1$ ) в течение всего времени существования ИТВ и оказывается в 3 – 4 раза меньше значений, характерных для стационарной фазы разряда. Возможные механизмы формирования внутреннего транспортного барьера на начальной стадии омического разряда рассмотрены в параграфе 4.2.3. Представленные в данном параграфе исследования позволили заключить, что образование ИТВ на начальной фазе омического разряда может быть результатом совместного воздействия низких значений магнитного шира и сильно неоднородного вращения плазмы, приводящего к подавлению турбулентности, ответственной за перенос. Наиболее вероятным представляется, что в исследуемом режиме происходит подавление диссипативной ТЕМ (Trapped Electron Mode) неустойчивости.

В **Заключении** изложены основные результаты работы и содержащиеся в ней выводы.

#### **Основные выводы и результаты работы**

1. Проведена модернизация диагностического комплекса, предназначенного для измерений электронной температуры методом томсоновского рассеяния. Основным результатом выполненной работы явилась разработка методики и схемы согласования многопроходной системы зондирования с оптическим квантовым генератором в условиях относительно высокой неоднородности активного элемента. Выбранная оптическая схема при расходимости лазерного луча 3 мрад дала возможность увеличить эффективную энергию зондирования плазмы до 55 Дж. При средней концентрации плазмы порядка  $2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  это позволило проводить измерения электронной температуры с точностью 7–15%. С использованием данного диагностического комплекса на токамаках ТУМАН-3 и ТУМАН-3М автором были проведены измерения профилей электронной температуры в различных режимах удержания.
2. Методом обратной транспортной задачи проведены вычисления локальных значений коэффициента электронной температуропроводности плазмы в различных режимах работы установок ТУМАН-3 и ТУМАН-3М.

3. Исследованы особенности перехода плазмы токамака ТУМАН-3 в Н-режим в условиях омического нагрева, круглого сечения плазмы и лимитерной магнитной конфигурации. Обнаружено, что в этом режиме, получившем название «омическая Н-мода», проявляется ряд особенностей, характерных для всех Н-режимов. Общими чертами являются: существенное (более чем в 2 раза) увеличение времени удержания энергии  $\tau_E$  и частиц  $\tau_p$ ; быстрый рост концентрации вблизи периферии, свидетельствующий о формировании периферийного транспортного барьера, уменьшение интенсивности турбулентности вблизи периферии плазмы. Вместе с тем, в омической Н-моде был обнаружен ряд особенностей, не типичных для Н-режимов, полученных в условиях дополнительного нагрева. Во-первых, переход в омическую Н-моду сопровождался кратковременным уменьшением электронной температуры во внешней части плазмы. Во-вторых, в омической Н-моде обнаружено подавление переноса тепла в градиентной области.

4. Проведено исследование локального переноса энергии в электронной компоненте при переходе плазмы токамака ТУМАН-3 в омическую Н-моду. Показано, что отмеченное выше уменьшение теплопереноса в градиентной области обусловлено, в значительной степени, возникновением конвективных потоков, направленных внутрь плазмы. Особенностью омической Н-моды является также задержка в формировании периферийного пьедестала на профиле электронной температуры. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что быстрый прогрев периферии не является необходимым условием для перехода в Н-режим.

5. Диапазон рабочих параметров установки ТУМАН-3 (ТУМАН-3М) существенно расширился в результате покрытия стенок вакуумной камеры соединениями бора (боронизации). В частности, благодаря боронизации диапазон доступных для исследования плазменных токов увеличился до 160 кА, концентраций – до  $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Более чем вдвое увеличилось и время удержания энергии  $\tau_E$ . Расширение диапазона операционных параметров установки позволило провести исследования параметрических зависимостей времени удержания энергии в омической Н-моде. Оказалось, что этот режим отличается от обыкновенного режима омического нагрева сильной зависимостью  $\tau_E$  от тока по плазме и вкладываемой мощности, а также слабой зависимостью  $\tau_E$  от концентрации. Такое же поведение  $\tau_E$  характерно и для Н-режимов с дополнительным нагревом, что позволяет предположить существование общего физического механизма, приводящего к подавлению переноса в Н-режиме.

6. Обнаружено, что в омической Н-моде зависимость времени удержания энергии  $\tau_E$  от тока плазмы оказывается более сильной, чем в традиционном Н-режиме при дополнительном нагреве. Причиной этого различия может являться формирование второго (внутреннего) транспортного

барьера, происходящее в омической H-моде при увеличении тока по плазме. Формирование внутреннего транспортно-барьера в омической H-моде при токе  $I_p=155$  кА подтверждено измерениями температурных профилей и численным моделированием коэффициента электронной температуропроводности.

7. Обнаружено, что на начальной стадии омического разряда во время интенсивной перестройки профиля тока по плазме в токамаке ТУМАН-3М при определенных экспериментальных условиях образуется внутренний транспортный барьер, приводящий к улучшению удержания энергии в электронной компоненте. Результаты численного моделирования этого режима показывают, что локализация области улучшенного удержания тепла в электронной компоненте совпадает с областью близких к нулю значений магнитного шира. Сформулирован вывод о том, что образование ИТВ может быть результатом совместного влияния низких значений магнитного шира и сильно неоднородного вращения плазмы.

#### Список работ, опубликованных по теме диссертации

- 1 A.I.Arbutov, L.G.Askinazi, V.I.Afanas'ev, ..., A.S.Tukachinsky, et al, Ohmic H-mode in TUMAN-3 tokamak //Proc. 17th Eur. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Heating, Amsterdam – 1990 – V.14B – Part. I – P.299-302
- 2 М.В. Андрейко, Л.Г. Аскинази, В.Е. Голант, ..., А.С.Тукачинский, Об учете влияния нестационарности при определении времени удержания энергии в токамаке //Письма в ЖТФ – 1997 – т. 23 – № 20 – с. 8-13
- 3 Yu.V. Petrov, G.T. Razdobarin, S.Yu. Tolstyakov, A.S. Tukachinsky, Photon Recycling Laser Probing of Tokamak Plasmas //Proc. of the 8-th International Symposium on Laser-aided Plasma Diagnostics, Doorwerth, Niderlands, 22-26 September 1997, p. 211-216
- 4 M.V.Andrejko, L.G.Askinazi, V.E.Golant, ..., A.S. Tukachinsky, et al, Recent results of H-mode studies in TUMAN-3 / Proc. 14th IAEA Conf. on Plasma Phys. and Controll. Nuclear Fusion Res., Wuerzburg – 1992 – v.I – P.485-494; (Preprint Phys.-Techn. Inst. No-1591, 1992, St.Petersburg)
- 5 L.G. Askinazi, V.E. Golant, A.I. Kanaev, ..., A.S. Tukachinsky, et al, Transport studies in Ohmic H-mode before and after boronization in TUMAN-3 // Proc. 20th EPS Conf. on Controll. Fusion and Plasma Phys., Lisboa – 1993 – v.17C – part IV – P.1509-1512
- 6 T.Yu. Akatova, L.G. Askinazi, V.I. Afanas'ev,... A.S. Tukachinsky, et al. Investigation of improved confinement regimes and density limit in TUMAN-3 tokamak //Proc 13-th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., (Washington, 1990) – IAEA – 1991 – v.I – P 509-526
- 7 M.V. Andrejko, L.G. Askinazi, V.E. Golant, S.V. Lebedev, A.S. Tukachinsky. Local transport studies in Ohmic H-mode in TUMAN-3 tokamak //Proc. 14-th

- Int. School on Plasma Phys. "Piero Caldirola" on Local Transport Studies in Fus. Plasmas, Varenna – 1993 – P.57-62
- 8 S V Lebedev, M V Andrejko, L G Askinazi, V E Golant, ..., A S Tukachinsky, et al, H-mode studies on TUMAN-3 and TUMAN-3M //Plasma Phys. Control. Fusion – 1996 – v. **38** – P.1103-1115
  - 9 M V Andrejko, L G Askinazi, V E Golant, ..., A S Tukachinsky, et al, New features of the energy confinement from TUMAN-3 Ohmic H-mode experiments // Plasma Physics and Controlled Fusion – 1994 – v.**36** – P. A165-A169
  - 10 М.В. Андрейко, Л.Г. Аскинази, В.Е. Голант, ..., А.С. Тукачинский, и др., Особенности удержания энергии, обнаруженные в экспериментах с Омической Н-модой в токамаке "ТУМАН-3" //Письма в ЖЭТФ – 1994 – т.59 – N 2 – стр. 94-97
  - 11 M.V.Andrejko, L.G.Askinazi, V.E.Golant, ..., A S Tukachinsky, et al, Ohmic H-mode studies in TUMAN-3 // Plasma Physics and Controlled Fusion – 1994 – v.**36** – p. B289-B299
  - 12 Андреева Т.Ю., Андрейко М.В., Аскинази Л.Г., Лебедев С.В., Тукачинский А.С., Численное моделирование некоторых физических процессов в плазме //Математические методы исследования управляемых динамических систем: Сб.статей под ред. В.И.Зубова. - СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та – 2000 – С.20-23. - (Вопросы механики и процессов управления; Вып.18)
  - 13 M V Andrejko, L G Askinazi, V E Golant, ..., A S Tukachinsky, et al, Energy confinement in Ohmic H-mode in TUMAN-3 // Proc. XV Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., Seville – 1994 – v.2 – P.37-44
  - 14 M.V.Andrejko, L.G.Askinazi, V.N.Budnikov, A S Tukachinsky, et al, Improved plasma confinement in TUMAN-3M and FT-2 tokamaks // Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference, Montreal – 1996 – v.**1** – p.891-898
  - 15 Будников В.Н., Буланин В.В., Дьяченко В.В., ..., А.С. Тукачинский, и др., Наблюдение улучшенного удержания в центре плазмы токамака ФТ-2 при быстром подъеме тока и нижегибридном нагреве // Письма в ЖЭТФ – 1997 – т.**23** – вып.18 – с.1-6
  - 16 В.Н.Будников, В.В.Буланин, А.В.Верс, ..., А.С. Тукачинский, и др., Эффект подавления флуктуаций плазмы при переходе в режим улучшенного удержания при быстром подъеме тока на токамаке ФТ-2 // Письма в ЖЭТФ – 1997 – т.**23** – вып.21 – с.51-57
  - 17 M.V. Andreiko, L.G. Askinazi, V.E. Golant, A S Tukachinsky, et al, Confinement Bifurcations by Poloidal Magnetic Flux Perturbations in the TUMAN-3M //29th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion, Montreux, ECA – 2002 – V.**26B** – O-1.02

- 18 S.V. Lebedev, M V Andreiko, L G Askinazi, ..., A S Tukachinsky, et al, Experimental study of the  $\beta$ -limit in ohmic H-mode in the TUMAN-3M tokamak //Plasma Phys. Control. Fusion – 1998 – v.**40** – P.741-746
- 19 M.V.Andrejko, L.G.Askinazi, V.E.Golant, ...,A S Tukachinsky, et al, Observation of Internal Transport Barrier in ohmically heated plasma in TUMAN-3M tokamak //1998 ICPP & EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys., Praha, ECA – 1998 – v.22C – p.313-316
- 20 M V Andrejko, L G Askinazi, M.I. Vild'zhunas, ..., A S Tukachinsky, et al, Electron heat balance in ohmic H-mode with Internal Transport Barrier in TUMAN-3M // Proc. 26th EPS Conf. on Controll. Fusion and Plasma Phys., Maastricht – 1999 – v.23J – p.1753-1756
- 21 М.В. Андрейко, Л.Г. Аскинази, В.Е. Голант, ..., А.С. Тукачинский и др., Формирование внутреннего транспортного барьера в Омической *H*-модер на токамаке ТУМАН-3М //Физика плазмы – 2000 – т.**26** – N3 – с.209-216
- 22 L.G. Askinazi, M.I. Vild'zhunas, V.E. Golant, ..., A S Tukachinsky, et al, Observation of Improved Confinement in the Initial Phase of the Ohmic Discharge in the TUMAN-3M //Proc. 29th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion, Montreux, ECA – 2002 – V.**26B** – P-2.070
- 23 L.G. Askinazi, V.V. Bulanin, M.I. Vildjunas, ..., A S Tukachinsky, et al, Study of Internal Transport Barrier in the Initial Phase of Ohmic Discharge in the TUMAN-3M Tokamak //Proc. 30th EPS Conference on Plasma Phys. and Contr. Fusion, St. Petersburg – 2003 – ECA – Vol. **27A** – P-3.152
- 24 L G Askinazi, V V Bulanin, M I Vildjunas, ..., A S Tukachinsky, et al, Study of internal transport barriers in the initial phase of Ohmic discharges in TUMAN-3M //Plasma Phys. Control. Fusion – 2004 – V.**46** – A51-A59
- 25 L.G. Askinazi, V.V.Bulanin, M.V.Gorokhov, ..., A S Tukachinsky, et al, Using of Two Frequency Doppler Reflectometer for Study of Internal Transport Barrier in TUMAN-3M Tokamak //Proc. 31st EPS Conference on Plasma Phys., London – 2004 – ECA – Vol.**28G** – P-1.189
- 26 В.А.Корнев, Л.Г.Аскинази, М.И.Вильдджюнас, ... А.С.Тукачинский и др., Возмущение электронной плотности в магнитных островах в токамаке ТУМАН-3М// Физика плазмы – 2005 – т.**31** – N10 – с.867-872