

Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

На правах рукописи

УДК 533.9



Куприенко Денис Васильевич

**РАЗВИТИЕ МНОГОПРОХОДНОГО
ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В
ТОМСОНОВСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ
В ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОГО КОМПОНЕНТА В
ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ
НА ТОКАМАКЕ ФТ-2.**

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: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Кантор М.Ю.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Сергеев В.Ю.

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Санников В.В.

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

Защита состоится 25 декабря 2008 г. в 16⁰⁰ 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 «25» ноября 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

На токамаке ФТ-2, главным направлением исследований которого было изучение взаимодействия волн нижнегибридного диапазона с плазмой, были обнаружены признаки перехода в режимы с улучшенным удержанием в различных сценариях разряда, например, при нижнегибридном (НГ) нагреве плазмы [1]. Однако о переходе в новое качественное состояние плазмы в этих экспериментах можно было судить лишь по косвенным признакам: по падению свечения линии H_{β} , по подавлению турбулентности, по росту глобального энергосодержания на основании данных диамагнитных измерений. Для подтверждения факта перехода в состояние с улучшенным удержанием, а также для понимания механизмов этого перехода требовался анализ локального электронного теплопереноса.

Поставленная задача исследования динамики локального электронного энергоданса на токамаке ФТ-2 потребовала проведения измерений электронной температуры и плотности в динамическом режиме с высоким пространственным разрешением, поскольку проводимые на токамаке эксперименты, например, с НГ нагревом или с подбросом тока плазмы, характеризуются быстрым изменением плазменных параметров. Единственной диагностикой, которая может обеспечить высокую точность локальных измерений эволюции электронной температуры с хорошим пространственным разрешением, является томсоновская диагностика.

Выполнение физической программы потребовало в первую очередь создания диагностики томсоновского рассеяния на токамаке ФТ-2, позволившей проводить измерения электронной температуры с частотой следования измерительных импульсов до 10-15 кГц. Столь высокого временного разрешения в сочетании с высоким пространственным разрешением диагностики и точностью измерений удалось добиться благодаря развитию метода [2, 3], основанного на лазерном многопроходном внутрирезонаторном зондировании плазмы.

Благодаря данным томсоновской диагностики удалось подтвердить влияние электронной температуры на характер взаимодействия НГ волны с плазмой [4], обнаружить эффективный нагрев электронов [5] и формирование транспортного барьера [6, 7] при вводе нижнегибридной мощности в плазму, а также провести анализ локального электронного энергоданса плазмы в динамических режимах токамака ФТ-2 [6].

Развитие диагностики проявилось также в создании системы лазерного внутрирезонаторного зондирования плазмы, которая была разработана и установлена на токамаке TEXTOR [8]. Использование многоимпульсной лазерной системы и быстрой TV камеры для регистрации спектров рассеяния позволило впервые измерить быструю эволюцию профилей электронной

температуры и плотности вдоль всего диаметра плазмы одновременно с высокой частотой и пространственным разрешением. Такие уникальные возможности нашли эффективное применение для исследования подавления магнитных островов при ЭЦР нагреве [9, 10]

Цели работы

1. Разработка и установка на ФТ-2 томсоновской диагностики, способной обеспечить измерения эволюции электронной температуры и плотности в одном разряде токамака в интервале 1-2 мс с временным разрешением от нескольких килогерц и выше и с точностью измерений $< 5\%$ в центре токамака и $< 10\%$ на периферии при пространственном разрешении не хуже 10 мм.
2. Проведение измерений динамики электронной температуры с помощью системы томсоновской диагностики для решения следующих физических задач:
 - 2.1. Проверка гипотезы о влиянии электронной температуры на характер взаимодействия НГ волн с плазмой и эффективность НГ нагрева за счёт механизма параметрического распада.
 - 2.2. Исследование динамики электронной температуры при нижнегибридном нагреве с целью определения оптимальных условий для эффективного нагрева плазмы.
 - 2.3. Исследование переходов в режимы улучшенного удержания и роли электронного компонента в этих переходах.

Новизна работы

Создана система томсоновской диагностики для токамака ФТ-2 с высоким временным разрешением измерений электронной температуры и плотности, построенная на принципах многопроходного внутрирезонаторного зондирования плазмы.

Впервые показана возможность применения лазерного внутрирезонаторного зондирования плазмы на токамаках среднего размера.

Впервые создана томсоновская диагностика, совмещающая высокое пространственное разрешение с большой частотой измерений, работающая на токамаке TEXTOR.

Обнаружен значительный рост энергосодержания электронного компонента при НГ нагреве плазмы в токамаке и формирование внутреннего

транспортного барьера в режиме взаимодействия нижегибридной волны с ионами.

Обнаружено подавление электронного переноса в экспериментах с нижегибридным нагревом и быстрым подъёмом плазменного тока во внутренней части плазменного шнура токамака ФТ-2. Найдена корреляция между снижением электронного теплового переноса в центральной области плазменного шнура, увеличением расчётного значения шира скорости полоидального вращения плазмы и подавлением турбулентности, измеренным во внешней области разряда.

Достоверность научных результатов

Результаты диссертационной работы экспериментально обоснованны. Достоверность результатов обеспечивается многократным повторением экспериментов и высокой точностью измерений. Кроме того, имеется хорошее соответствие с теоретическими предсказаниями.

Практическая значимость работы

Создание томсоновской диагностики на токамаке ФТ-2 с высоким временным и пространственным разрешениями измерений электронной температуры и плотности позволило серьёзно продвинуться в понимании механизмов взаимодействия нижегибридных волн с плазмой. Новая диагностика позволила провести подробный анализ переходов к режимам с улучшенным удержанием в динамических экспериментах на токамаке ФТ-2.

Продемонстрирована возможность применения внутррезонаторного зондирования плазмы в томсоновской диагностике на токамаках средних размеров. Это открывает возможность применения метода и на более крупных плазменных установках для создания томсоновской диагностики с высокой частотой и пространственным разрешением.

Личное участие автора

Представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Автор принимал личное участие на всех стадиях разработки и при запуске систем томсоновской диагностики на токамаках ФТ-2 и TEXTOR. При непосредственном участии автора были проведены представленные в работе эксперименты на токамаке ФТ-2 по нижегибридному нагреву плазмы, с быстрым подъёмом плазменного тока, с сильным смещением плазменного шнура, с переходом от режима нижегибридной генерации тока к режиму нагрева ионов. Численное моделирование с помощью разработанного в Курчатовском Институте кода АСТРА [11], представленное в работе, также выполнено непосредственно автором.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка и создание системы томсоновской диагностики на токамаке ФТ-2, основанной на принципах внутрирезонаторного зондирования, позволяющей проводить измерения эволюции электронной температуры и плотности с частотой до 10-15 кГц.
2. Разработка и создание системы лазерного двухпроходного внутрирезонаторного зондирования плазмы для томсоновской диагностики токамака TEXTOR, в которой реализована возможность одновременного высокого пространственного разрешения (измерения эволюции до 100 пространственных точек на профилях электронной температуры и концентрации) с высоким временным разрешением (частота проведения измерений ~ 5 кГц).
3. Эффект влияния снижения электронной температуры при постоянной плотности плазмы на переход режима поглощения мощности нижегибридных волн от электронного к ионному, связанного с возбуждением параметрической распадной неустойчивости на периферии плазмы.
4. Обнаружение эффекта существенного роста электронной температуры при нижегибридном нагреве плазмы в режиме взаимодействия с ионным компонентом.
5. Эффект подавления электронного теплового переноса в центральной части плазменного шнура в экспериментах с НГ нагревом и быстрым подъёмом тока плазмы на токамаке ФТ-2.

Апробация работы и публикации

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 1994 – 2007 г.г. и представлены в 30 докладах на международных конференциях и совещаниях, а также опубликованы в 17 статьях в реферируемых журналах. Кроме того, результаты диссертации неоднократно представлялись на Всероссийской Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, а также на совместных симпозиумах, проводимых Калэмским научным центром (Великобритания) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе и Технологическим университетом г. Хельсинки (Финляндия) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 118 страниц печатного текста, в том числе: 70 рисунков и список литературы, состоящий из 111 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** к диссертации обоснована актуальность представляемой работы, обрисован круг решаемых задач, а также приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 представляет собой обзор литературы, который состоит из двух основных частей. Первая часть посвящена нижегибридному нагреву, а вторая – томсоновской диагностике плазмы. В параграфе 1.1 обсуждаются общие свойства и специфика нагрева плазмы волнами нижегибридного диапазона. В начале параграфа представлены основные механизмы взаимодействия нижегибридных волн с ионами и электронами. Дается краткое представление о поглощении НГ волн по механизму Ландау и стохастическом поглощении, а также о параметрических неустойчивостях, которые могут развиваться на периферии плазме при вводе НГ мощности. Проводится краткий анализ результатов экспериментов по НГ нагреву на различных установках. В разделе 1.2 дан обзор экспериментов по НГ нагреву на токамаке ФТ-2, предшествовавших данной работе. Приведены основные достижения, полученные в различных режимах нагрева, обсуждается достигнутая эффективность ионного и электронного нагрева. Проводится обзор основных механизмов, предложенных для объяснения результатов экспериментов с НГ нагревом на ФТ-2. Отмечается невозможность в пороговой плотности генерации быстрых ионов. Высказывается предположение о влиянии электронной температуры на механизм взаимодействия НГ волн с плазмой. Обсуждаются общие закономерности в результатах экспериментов с НГ нагревом на ФТ-2 и других установках, где подобные исследования проводились. Далее приводятся предположения о переходе в режим улучшенного удержания на ФТ-2 при НГ нагреве. Отмечается, что отсутствие данных об эволюции электронной температуры и плотности не позволяет с уверенностью говорить о таком переходе. В конце параграфа обозначаются основные физические задачи, которые являются насущными на ФТ-2 в рамках проведенного обзора. Следует вывод о необходимости разработки и создании на этом токамаке томсоновской диагностики, способной проводить детальные измерения эволюции электронного компонента.

Параграф 1.3 посвящён диагностике томсоновского рассеяния, её основным компонентам и обзору существующих в мире систем. В разделе 1.3.1 кратко описана суть диагностики и требования экспериментаторов к её параметрам. В разделе 1.3.2 подробно описаны основные составляющие диагностики томсоновского рассеяния. В разделе 1.3.3 дан обзор существующих систем томсоновской диагностики. В параграфе 1.3.4 приведены требования к диагностике применительно к ФТ-2 и дана оценка

ожидаемой точности измерений при использовании традиционного подхода к лазерному зондированию. Сделан вывод о том, что при традиционном подходе невозможно достичь требуемых параметров к системе зондирования по точности и временному разрешению измерений эволюции электронного компонента в условиях ФТ-2.

В разделе 1.3.5 обсуждается возможность применения в системе лазерного зондирования томсоновской диагностики ФТ-2 подхода, основанном на многопроходном внутриврезонаторном зондировании (МВЗ) плазмы. Приведена общая схема и основные принципы системы МВЗ. Сделан вывод о том, что именно этот подход может быть оптимальным для получения требуемых параметров создаваемой томсоновской диагностики.

В конце главы (раздел 1.5) сделана постановка задачи.

Глава 2 посвящена развитию МВЗ в томсоновской диагностике и реализации этого подхода в системах томсоновского рассеяния на установках ФТ-2 и TEXTOR.

В параграфе 2.1 подробно описана реализация диагностики на токамаке ФТ-2. Описано применение МВЗ и параметры системы, реализованные на ФТ-2. Приводятся параметры генерации лазера в многопроходной системе. Отмечается высокий уровень энергии ($\sim 70-100$ Дж) в отдельном импульсе зондирования и высокая частота следования лазерных импульсов ($\sim 10-15$ кГц). Далее описана система сбора света и приведены основные её параметры, обсуждается динамический диапазон измеряемых температур. Дана оценка ожидаемой точности измерений на основании ожидаемого числа рассеянных фотоэлектронов. В разделе 2.1.5 приводятся измерения динамики электронной температуры на стационарной стадии разряда. Отмечается хорошее соответствие статистического разброса температуры с погрешностью в отдельном измерении. Далее приводится график эволюции электронной температуры при быстрых изменениях параметров плазмы (восстановление температуры после срыва). Показана способность диагностики производить точные измерения с хорошим временным разрешением быстрых процессов в плазме с характерными временами ~ 1 мс. В конце параграфа приводятся достигнутые параметры диагностики при многопроходном внутриврезонаторном зондировании плазмы. Отмечается, что реализация МВЗ на ФТ-2 позволила проводить 10-20 отдельных измерений эволюции электронной температуры и плотности в одном разряде токамака с точностью $\sim 3-7$ % в центре плазмы и 10-20% на периферии, с пространственным разрешением ~ 6 мм и с временным интервалом до 100 мкс между отдельными измерениями, что вполне соответствует предъявляемым к диагностике требованиям.

Параграф 2.2 посвящён анализу возможности внутриврезонаторного зондирования в томсоновской диагностике токамака TEXTOR. Во введении выдвинуты требования к основным параметрам системы. Далее исследуется

возможность многопроходного зондирования на токамаках среднего размера в геометрии токамака TEXTOR. Приведены параметры лазерной генерации при 14-проходном зондировании в такой системе. Исследуется пространственное разрешение диагностики в такой системе. Сделан вывод о целесообразности реализации двухпроходного зондирования в условиях токамака TEXTOR. В разделе 2.3 описана реализация двухпроходного зондирования в системе томсоновского рассеяния на токамаке TEXTOR. В начале раздела проводится исследование работы лазера в двухпроходной схеме с пассивным модулятором добротности. Приведены осциллограммы лазерных генераций в такой схеме, отмечаются достаточно высокие параметры зондирования по частоте следования импульсов и пространственному разрешению. Отмечен низкий для томсоновской диагностики уровень зондирующей мощности. Основным недостатком схемы связывается с невозможностью генерации лазерных импульсов в заранее определённые моменты времени. Сделан вывод о необходимости применения активного модулятора добротности в двухпроходной схеме зондирования. Далее обсуждается исследование работы лазера в двухпроходной схеме с Ячейкой Поккельса в качестве активного затвора в резонаторе и результаты генерации лазера в такой системе. Затем описаны блок накачки и управления (2.3.5) и оптическая схема лазера (2.3.6). В разделе 2.3.7 показана схема лазерного зондирования, реализованная на токамаке TEXTOR, а также приведены параметры генерации лазера и характеристики пространственного разрешения такой системы. В разделе 2.3.8 представлена система сбора света, ключевым элементом которой является сверхбыстрый детектор (CMOS-камера), позволяющий делать до 10900 кадров в секунду. Далее (2.3.9) дана оценка ожидаемой точности измерений диагностики и сравнение с экспериментальной величиной погрешности. В разделах 2.3.10 и 2.3.11 в качестве иллюстрации возможностей диагностики приводятся данные измерений профиля электронной температуры в статическом острове, а также эволюция параметров электронного компонента в динамическом режиме при вращении магнитного острова $m/n=2/1$ на токамаке TEXTOR. В заключении к главе 2 делается вывод об эффективности подхода МВЗ в томсоновской диагностике, а также приводятся основные параметры, достигнутые в системах томсоновского рассеяния на токамаках ФТ-2 и TEXTOR.

В **Главе 3** исследуется влияние электронной температуры на взаимодействие НГ волны с плазмой в режиме перехода от генерации нижнегибридного тока к нагреву ионов. В разделе 3.1 приводится описание условий эксперимента, а также представлены основные экспериментальные данные. В следующем разделе проводится анализ результатов. Отмечается падение электронной температуры, вызванное уменьшением омического энергоклада, на стадии НГ генерации тока при сохранении постоянного уровня плотности плазмы. Предполагается, что падение электронной

температуры приводит к преодолению порога развития параметрической неустойчивости $P_{th} \sim T_e^\alpha/n_e^\beta$. Приводятся факты, говорящие в пользу параметрического распада вводимой волны, в первую очередь это измерения высокочастотных колебаний на периферии плазмы с помощью ВЧ зонда. При включении НГ мощности в спектре ВЧ флуктуаций наблюдался рост сателлита, сдвинутого в низкочастотную область на 30 МГц. Частотный сдвиг сателлита соответствует значению ионной циклотронной частоты f_{ci} на периферии разряда на внешнем обводе со стороны слабого магнитного поля. Предполагается, что в этой области происходит параметрический распад вводимой НГ волны f_0 на дочерние волны с частотой $f_0 - f_{ci}$ и f_{ci} , что приводит к резкому отключению генерации НГ тока, поскольку замедленные волны не могут поддерживать НГ ток из-за слабого их взаимодействия с электронами плато функции распределения, несущими этот ток. Переход к режиму взаимодействия с ионами характеризуется начинающимся сразу после выключения НГ тока ростом потока атомов перезарядки из центра плазмы с энергией $\sim 1\text{кЭв}$. Появление в центре плазмы ионов с энергией $\sim 8T_i$ свидетельствует о том, что исходная НГ волна испытывает сильное поперечное замедление с $N_{\perp} \approx \frac{c}{2\sqrt{2}v_{Ti}} \sim 600$. Волны с таким сильным замедлением

эффективно взаимодействуют с ионами плазмы, что отражается на росте ионной температуры. Оценка продольного замедления для волн с $N_{\perp} \sim 600$ в предположении нижнегибридного дисперсионного соотношения даёт величину $N_{||} \sim 10$. Такие волны могут также взаимодействовать и с электронами с энергией $>2\text{кэВ}$ по механизму Ландау, что подтверждается скачком уровня мягкого рентгеновского излучения в центре разряда. Таким образом, данные различных диагностик говорят в пользу предположения о том, что снижение электронной температуры сопряжено с возбуждением параметрической распадной неустойчивости НГ волны на периферии плазмы, что в итоге определяет наблюдаемое изменение механизма взаимодействия НГ волны с плазмой.

Глава 4 посвящена исследованию динамики электронного компонента в режимах с улучшенным удержанием на ФТ-2. В параграфе 4.1 анализируется эксперимент по НГ нагреву, в котором была продемонстрирована рекордно высокая для ФТ-2 эффективность нагрева ионной и электронной компонент при мощности дополнительного нагрева $P_{LHH} \sim 90\text{kW}$. В разделе 4.1.1 дано подробное описание условий эксперимента и приведены основные экспериментальные данные. Отмечается сильный рост электронной температуры в центре разряда в области $r < 3.5\text{ см}$ и образование резкого периферийного градиента на профиле плотности (Рисунок 1). В следующем разделе обсуждается методика моделирования энергобаланса с помощью кода АСТРА. Приводятся основные источники вкладываемой и теряемой мощности

в электронах согласно формуле $\nabla \cdot q_e = P_{OH} - P_{ei} - P_{rad} - \frac{3}{2} \frac{\partial(nTe)}{\partial t}$,

описана процедура моделирования, включающая в себя подбор величины Z_{eff} по совпадению измеренного и расчётного напряжений обхода. Далее анализируются результаты расчёта эффективного коэффициента температуропроводности, который во время ВЧ падает почти на порядок внутри области $r < 6$ см. Корреляция такого подавления теплопереноса с наблюдаемым в области $r \sim 6$ см ростом градиента на профиле плотности (Рисунок 1), может указывать на формирование на периферии плазменного шнура транспортного барьера. Переход в режим улучшенного удержания также подтверждается продолжающимся после выключения НГ нагрева ростом электронного энергосодержания (Рисунок 2).

В разделе 4.2 анализируются дополнительные НГ нагреву плазмы с

результаты эксперимента по повышенной мощностью ВЧ генератора ($P_{LHH} \sim 180$ кВт). В разделе 4.2.1 описаны условия эксперимента, приведены основные экспериментальные данные. В начале следующего раздела, посвящённого моделированию энергоданса и расчёту коэффициентов переноса, обсуждается вопрос о целесообразности учёта в уравнении энергоданса прямого вклада от НГ волны в электроны. Затем приводятся результаты расчёта кодом АСТРА, которые показывают более чем двукратное падение эффективного коэффициента температуропроводности во время ВЧ в центральных областях плазмы. Переход в режим улучшенного удержания, о котором также свидетельствует падение свечения линии H_{β} , подтверждается ростом электронного энергосодержания и во время ВЧ нагрева, и после его

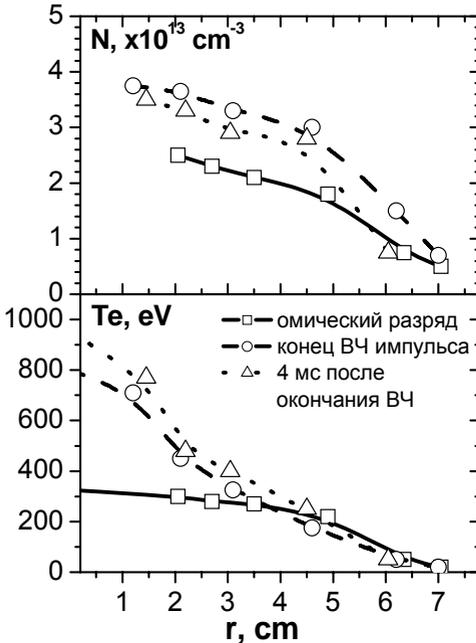


Рисунок 1

Эволюция профилей электронной температуры и плотности при НГ нагреве мощностью 90 кВт.

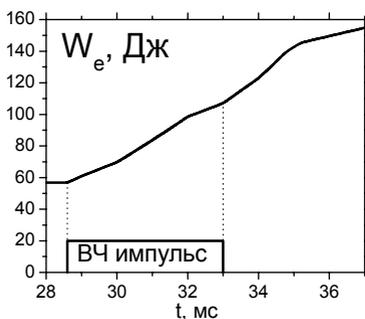


Рисунок 2
Эволюция электронного энергосодержания во время и после НГ нагрева

показывает, что подавление переноса и рост энергосодержания при НГ нагреве явились следствием ввода ВЧ мощности в плазму. Утверждается, что смещение шнура и поджатие канала тока, происходящие вследствие нагрева плазмы, могут способствовать переходу в режим улучшенного удержания при дополнительном ВЧ нагреве, однако определённно не являются первопричиной такого перехода.

В разделе 4.2.4 проводится сравнение динамики коэффициента эффективной температуропроводности с временной эволюцией интенсивности микрофлуктуаций плотности с $q_R \sim 60 \text{ cm}^{-1}$ на периферии плазмы, измеряемой диагностикой усиленного рассеяния. Отмечается хорошая корреляция этих сигналов во время ВЧ нагрева. Расчёт на основании экспериментальных данных радиального электрического поля в неоклассическом приближении, сделанный в разделе 4.2.5, позволяет оценить динамику шири скорости полоидального вращения плазмы, который существенно вырастает во время ВЧ. Корреляция шири $\omega_{\text{ЕХВ}}$ с динамикой теплопереноса и уровнем турбулентности позволяет предположить в данном случае механизм подавления турбулентности за счёт роста шири $\omega_{\text{ЕХВ}}$, что в итоге приводит к наблюдаемому улучшению удержания энергии в плазме. В разделе 4.2.6 анализируется эффективность НГ нагрева в режимах с улучшенным удержанием. Сделан вывод о том, что НГ мощность напрямую в электроны не вкладывается, а рост электронного энергосодержания во время ВЧ нагрева объясняется падением электронного переноса в плазме. В параграфе 4.3 исследуется влияние быстрой динамики тока плазмы на электронный перенос в плазме токамака ФТ-2. Наблюдаемое улучшение удержания в электронном компоненте так же, как и в экспериментах с НГ нагревом, достаточно хорошо

отключения. Далее обсуждается влияние сильного смещения плазменного шнура во время импульса нагрева на изменение теплопереноса. Анализируются результаты эксперимента с сильным смещением плазменного шнура в отсутствие НГ нагрева, в котором с помощью управляющих полей воспроизводится скорость и величина смещения плазменного шнура наружу при ВЧ нагреве. Показано, что смещение шнура без ввода ВЧ мощности не приводит к падению теплопереноса, а скорее наоборот, только ухудшает его. Сравнение двух экспериментов с сильным смещением шнура

коррелирует с динамикой низкочастотной составляющей в спектре микрофлуктуаций плотности, а также с ростом рассчитанного в неоклассическом приближении на основании экспериментальных профилей шира скорости полоидального вращения плазмы. В выводах к главе (параграф 4.4) предполагается наличие общих закономерностей в наблюдаемом подавлении переноса в обсуждаемых динамических экспериментах на ФТ-2.

В разделе **Закключение** диссертационной работы изложены основные выводы и результаты:

1. Опыт применения многопроходного внутриврезонаторного зондирования в лазерных системах томсоновских диагностик на токамаках ФТ-2 и TEXTOR показал эффективность данного подхода в диагностике. Благодаря ему получены параметры томсоновской диагностики, недостижимые при традиционном подходе к зондированию плазмы.

Томсоновская диагностика на токамаке ФТ-2 позволяет проводить измерения эволюции электронной температуры и плотности в одном разряде токамака с временным интервалом до 100 мкс между отдельными измерениями и с точностью измерений $\sim 3\text{--}7\%$ в центре токамака и $\sim 10\text{--}20\%$ на периферии при пространственном разрешении ~ 6 мм. Диагностика позволяет производить 10 - 20 измерений электронной температуры и плотности за один разряд токамака.

На токамаке TEXTOR проведены измерения с временным интервалом 200 мкс между отдельными измерениями и с точностью измерений $\sim 3.5\%$ для плотности и $\sim 6\%$ для температуры при центральной плотности $n \sim 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ с пространственным разрешением ~ 9 мм. При этом за один разряд токамака производится до 30 измерений пространственных профилей, до 100 пространственных точек в каждом.

Такие измерения дают возможность детально исследовать поведение электронной температуры и плотности в быстрых динамических процессах в плазме.

2. В режиме с отключением нижнегибридной генерации тока на ФТ-2 показано, что электронная температура может быть ещё одним параметром, помимо плотности, который влияет на пороги развития параметрических неустойчивостей в плазме. В режиме с переходом от нижнегибридной генерации тока к генерации быстрых ионов снижение электронной температуры при постоянном уровне плотности является причиной отключения нижнегибридного тока и переходу к взаимодействию замедленной нижнегибридной волны с ионами, связанного с развитием параметрической неустойчивости на периферии плазмы. Утверждение о решающей роли электронной температуры в изменении механизма взаимодействия НГ волны с плазмой хорошо согласуется с теоретическими положениями и экспериментальными наблюдениями.

3. В результате проведения экспериментов по НГ нагреву плазмы на токамаке ФТ-2 обнаружен нагрев электронов, сопровождающий

значительный нагрев ионов ($\Delta T_i \sim 180$ Эв) при мощности НГ нагрева $P_{\text{ЛН}} \sim 90$ кВт. Электронная температура в самом центре плазменного шнура вырастает более чем в 2 раза. Существенная динамика T_e наблюдается внутри области $r < 3.5$ см. Появление значительного градиента на профиле плотности в области $r \sim 5-6$ см может указывать на образование здесь транспортного барьера. Анализ энергобаланса плазмы свидетельствует о существенном подавлении электронной температуропроводности внутри области $r < 6$ см во время ввода ВЧ мощности. На подавление электронного теплового переноса указывает также продолжающийся после окончания импульса ВЧ рост электронной температуры.

4. Наблюдаемый рост электронной температуры в различных режимах с НГ нагревом связывается не с вкладом энергии от внешнего источника, а с улучшением удержания в электронном компоненте. Обнаружено, что эффективность электронного НГ нагрева не зависит от мощности ВЧ источника, а определяется исключительно степенью подавления переноса.

5. Проведённый анализ экспериментальных данных в динамических режимах (с НГ нагревом и с быстрым подъёмом тока) на токамаке ФТ-2 свидетельствует о переходе плазмы в этих экспериментах в состояние улучшенного удержания, что подтверждается существенным падением коэффициентов электронного переноса, ростом электронного энергосодержания, снижением уровня периферийной турбулентности.

6. Обнаружена корреляция подавления электронной температуропроводности и роста ширины скорости полоидального вращения, рассчитанного согласно неоклассической теории по экспериментальным профилям температуры и плотности, для значительной части плазменного шнура как в экспериментах с НГ нагревом, так и в экспериментах с быстрым подъёмом тока. Подавление электронного теплового переноса в режимах с НГ нагревом и быстрым подъёмом тока, по всей видимости, связано с существенным ростом градиента радиального электрического поля в областях плазмы $r \sim 4-6$ см. Подтверждением этих предположений является измеренная динамика уровня коротковолновой микротурбулентности в диапазоне колебаний, связанной с диссипативной модой дрейфовой неустойчивости на запертых электронах. Изменение уровня флуктуаций плотности хорошо согласуется с эволюцией коэффициентов переноса и динамикой ширины скорости полоидального вращения плазмы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ В РЕФЕРИРУЕМЫХ ИЗДАНИЯХ ПО ТЕМЕ
ДИССЕРТАЦИИ:

- 1) Кантор М.Ю., Куприенко Д.В. Лазерное многопроходное зондирование в томсоновской диагностике плазмы. // Письма в ЖТФ.- 1997.- т.23, 8. – с. 65-72; Techn. Phys. Letters. – 1997. - v. 23, 4. - p. 321-323.
- 2) Кантор М.Ю., Будников В.Н., Дьяченко В.В. и др. Измерение эволюции электронной температуры с помощью многоимпульсной томсоновской диагностики при НГ нагреве плазмы токамака ФТ-2. // Физика плазмы. – 1998. - 24, 3. - с.230-233.
- 3) Kantor M.Yu., Kouprienko D.V. High repetition rate probing laser for Thomson scattering diagnostics. // Review of Scientific Instruments. – 1999. - v. 70, 1. - p.780-782.
- 4) В.Н. Будников, В.В. Буланин, Л.А. Есипов и др. “Нелокальный” перенос в экспериментах с быстрым подъемом тока на токамаке ФТ-2. // Письма в ЖТФ. – 1999. - т.25, 12. - с.1053-1059.
- 5) S.I.Lashkul, V.N.Budnikov, A.A.Borevich et al. Mechanizm of the transport barrier formation at lower hybrid heating in the FT-2 tokamak experiments. // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2000. - v.42. - p. A169 - A174.
- 6) В.Н.Будников, В.В.Дьяченко, П.Р.Гончаров и др. Механизм подавления нижнегибридной генерации тока на токамаке ФТ-2. // Письма в ЖТФ. – 2000. - т.26, 2. - с. 41-46.
- 7) M.Yu. Kantor, C.J. Barth, D.V. Kouprienko, H.J. van der Meiden. Test of a periodic multipass-intracavity laser system for the TEXTOR multiposition Thomson scattering diagnostics. // Review of Scientific Instruments. – 2001. - v. 72, 1. - p.1159-1161.
- 8) S.I.Lashkul, V.N.Budnikov, E.O.Vekshina, V.V.Dyachenko, L.A.Esipov, E.R.Its, M.Yu.Kantor, D.V.Kouprienko, A.Yu.Popov, S.V.Shatalin. Effect of the Radial Electric Field on Lower Hybrid Plasma Heating in the FT-2 Tokamak. // Plasma Physics Reports. – 2001. -V27, 12. – p.1001–1010.
- 9) S.I.Lashkul, V.N.Budnikov, V.V.Dyachenko, L.A.Esipov, E.R.Its, M.Yu.Kantor, D.V.Kouprienko, A.Yu.Popov, P.R.Goncharov, S.V.Shatalin, E.O.Vekshina, V.B.Yermolayev. Formation of Transport Barriers in Lower Hybrid Experiment at FT-2 tokamak. // Journal of Plasma and Fusion Research. – 2001. - vol.4. – с.229-233.
- 10) S.I.Lashkul, V.N.Budnikov, V.V.Dyachenko, P.R.Goncharov, L.A.Esipov, E.R.Its, M.Yu.Kantor, D.V.Kouprienko, A.D.Lebedev, S.V.Shatalin, E.O.Vekshina.Processes in SOL Plasma at the Transition into Improved Confinement Mode in FT-2 Tokamak. // Plasma Phys. Control. Fusion. -2002. – v.44. – p.653-663.
- 11) S.I.Lashkul, V.N.Budnikov, A.D.Gurchenko, E.Z.Gusakov, V.V.Dyachenko, L.A.Esipov, E.R.Its, M.Yu.Kantor, D.V.Kouprienko, K.M.Novik, A.Yu.Popov, S.V.Shatalin, A.Yu.Stepanov, E.O.Vekshina, V.B.Yermolaev.

- Dynamics of the Transport Barrier Formation on the FT-2 Tokamak Caused by Low Hybrid Heating. // *Czechoslovak Journal of Physics*. 2002. - v.52, 10. - p.1149-1159.
- 12) H.J.vanderMeiden, C.J.Barth, T.Oyevaar, S.K.Varshney, A.J.H.Donné, M.Yu.Kantor, D.V.Kouprienko, A.Alexeev, W.Biel, A.Pospieszczyk. 10kHz repetitive high-resolution TV Thomson scattering on TEXTOR. // *Rev.Sci.Instrum.* – 2004. –v.75. – p.3849.
 - 13) A.J.H.Donné et al. Overview of Core Diagnostics for TEXTOR. // *Fusion Science and Technology*. -2005. - v. 47, 2. - p.220-245.
 - 14) E.Z.Gusakov, A.D.Gurchenko, A.B.Altukhov, A.Yu Stepanov, L.A.Esipov, M.Yu Kantor, D.V.Kouprienko. Investigation of ETG mode-scale component of tokamak plasma turbulence by correlative enhanced scattering diagnostics. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. -2006. - v. 48, 5A. - p.A371-A376.
 - 15) H.J. van der Meiden, S.K.Varshney, C.J.Barth, T.Oyevaar, R.Jaspers, A.J.H.Donne, M.Yu.Kantor, D.V.Kouprienko, E.Uzgel, W.Biel, A.Pospieszczyk and TEXTOR Team. 10 kHz repetitive high-resolution TV Thomson scattering on TEXTOR: Design and performance. // *Review Of Scientific Instruments*. -2006. – v.77. - 10E512.
 - 16) E.Z.Gusakov, A.D.Gurchenko, A.B.Altukhov, V.V.Bulanin, L.A.Esipov, M.Yu Kantor, D.V.Kouprienko, S.I.Lashkul, A.V.Petrov, A.Yu Stepanov. Investigation of small-scale tokamak plasma turbulence by correlative UHR backscattering diagnostics. // *Plasma Phys. Control Fusion*. -2006. – v.48(12B). - B443-B451.
 - 17) A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov, A.B. Altukhov, A.Yu. Stepanov, L.A. Esipov, M.Yu. Kantor, D.V. Kouprienko, V.V. Dyachenko and S.I. Lashkul. Observation of the ETG mode component of tokamak plasma turbulence by the UHR backscattering diagnostics. // *Nucl. Fusion*. -2007. – v.47. – p.245–250.

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- 1 Будников В.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1994. т.59, вып. 10, с. 651
- 2 Гусев В.К., Кантор М.Ю., Раздобарин Г.Т., Авт. Свид. N 1421072, Открытия и изобретения, 1990, N8, с. 286.
- 3 Кантор М.Ю., Куприенко Д.В. Лазерное многопроходное зондирование в томсоновской диагностике плазмы. // Письма в ЖТФ, 1997, т.23, 8, стр 65-72; Techn. Phys. Letters, 1997, v. 23, 4, p. 321-323.
- 4 В.Н.Будников, В.В.Дьяченко, П.Р.Гончаров и др. Механизм подавления нижегибридной генерации тока на токамаке ФТ-2. // Письма в ЖТФ, 2000, т.26, 2, с. 41-46
- 5 Кантор М.Ю., Будников В.Н., Дьяченко В.В. и др. Измерение эволюции электронной температуры с помощью многоимпульсной томсоновской диагностики при НГ нагреве плазмы токамака ФТ-2. // Физика плазмы, 1998, 24, 3, с.230-233; Plasma Phys. Reports, 1998, v. 24, 3, p. 202-205.
- 6 S.I.Lashkul, V.N.Budnikov, A.A.Borevich et al. Mechanizm of the transport barrier formation at lower hybrid heating in the FT-2 tokamak experiments. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2000, v.42 p. A169- A174
- 7 S.I.Lashkul, V.N.Budnikov, V.V.Dyachenko, L.A.Esipov, E.R.Its, M.Yu.Kantor, D.V.Kouprienko, A.Yu.Popov, P.R.Goncharov, S.V.Shatalin, E.O.Vekshina, V.B.Yermolayev. Formation of Transport Barriers in Lower Hybrid Experiment at FT-2 tokamak. // Journal of Plasma and Fusion Research, vol.4, Japan, 2001, 229-233.
- 8 A.J.H.Donné et al. Overview of Core Diagnostics for TEXTOR. // Fusion Science and Technology, v. 47, 2 (2005) p.220-245
- 9 M.Yu.Kantor, A.J.H.Donné, R.Jaspers, D.V.Kouprienko, H.J.van der Meiden, T.Oyevaar, A.Pospieszczyk, G.W.Spakman, S.K.Varshney, E.Uzgel. Multipulse Thomson scattering on TEXTOR. 13th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics. // Takayama, Japan, September 18-21, 2007.
- 10 H.J. van der Meiden, S.K.Varshney, C.J.Barth, T.Oyevaar, R.Jaspers, A.J.H.Donne, M.Yu.Kantor, D.V.Kouprienko, E.Uzgel, W.Biel, A.Pospieszczyk and TEXTOR Team. 10 kHz repetitive high-resolution TV Thomson scattering on TEXTOR: Design and performance. // Review Of Scientific Instruments, 77, 10E512 2006.
- 11 Pereverzev G and Yushmanov P N 2002 ASTRA automated system for transport analysis in a tokamak Rep. 5/98, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching.