

Национальный Исследовательский Центр Курчатовский институт
Институт физики токамаков

На правах рукописи
УДК 621.039.66+533.9.16

МЕЛЬНИКОВ

Александр Владимирович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ В ПЛАЗМЕ
ТОРОИДАЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

МОСКВА

2011

Работа выполнена в Институте физики токамаков Национального
Исследовательского Центра Курчатовский институт

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Стрелков Вячеслав Сергеевич

доктор физико-математических наук,
профессор Батанов Герман Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор Попов Александр Михайлович.

Ведущая организация:

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

Защита состоится « » 2012 г. в часов на заседании
диссертационного совета Д520.009.02 по адресу: 142190, г. Москва, пл. ак.
Курчатова д. 1, НИЦ Курчатовский институт.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ Курчатовский
институт.

Автореферат разослан « » 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

А.В. Демура

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации представлены результаты экспериментального исследования электрического потенциала плазмы тороидальных магнитных ловушек с помощью зондирования плазмы пучком тяжелых ионов. Приведены описания разработанных диагностических комплексов для зондирования плазмы токамака T-10 и стелларатора TJ-II, и полученные с их помощью результаты измерений стационарных профилей потенциала плазмы и его осциллирующей компоненты в виде квазимонохроматических и широкополосных колебаний. Исследован широкий спектр режимов трех установок: TM-4, T-10 и TJ-II с различными методами нагрева плазмы, и выявлены общие закономерности в поведении электрического потенциала в замагниченной плазме.

Актуальность темы

Исследования электрических полей является одной из актуальных научных проблем, существующих в настоящее время в физике плазмы. Эти исследования связаны как с фундаментальной проблемой – **описанием природы (феномена)** возникновения электрического поля в квазинейтральной плазме, так и с прикладной проблемой – влиянием электрического поля на процессы переноса в плазме в замкнутых магнитных конфигурациях [1].

Известно, что в процессах переноса доминируют аномальные механизмы, связанные с плазменной турбулентностью. В настоящее время в исследованиях по магнитному удержанию доминирует гипотеза о стабилизации плазменной турбулентности и аномального переноса с помощью шира (радиальной неоднородности) полоидального вращения плазмы в скрещенных радиальном электрическом E_r и тороидальном магнитном B_t полях [2]. Однако, эта гипотеза имеет, как подтверждения, так

и контрпримеры в эксперименте, поэтому вопрос о роли E_r в удержании плазмы по-прежнему остается открытым.

Исследования роли E_r в удержании плазмы и плазменной турбулентности в замкнутых магнитных ловушках приобрели необычайную популярность в физике плазмы в последние годы. На Европейских конференциях по физике плазмы (EPS Conference on Plasma Physics), Международных конференциях по термоядерной энергетике (IAEA FEC – Fusion Energy Conference) и Конгрессах по физике плазмы (Congress on Plasma Physics) докладываются результаты экспериментальных и теоретических исследований, которые проводятся практически на всех токамаках и стеллараторах, существующих в мире в настоящее время. Этой важной теме посвящается специальное тематическое международное совещание (REFPCE – Role of Electric Field in Plasma Confinement and Exhaust), которое проводится ежегодно как присоединенное совещание к Европейским конференциям (EPS satellite meeting).

Другие конференции по физике плазмы, такие как, например, Международная Токи конференция (ITC, International Toki Conference), Международное совещание по проблемам стеллараторов (International Stellarator Workshop), Европейская конференция по теории плазмы (European conference on plasma theory) и Международная Школа-конференция в Алуште (Alushta International Conference-School) посвящают множество докладов исследованию различных явлений, связанных с электрическими полями, вращением плазмы и турбулентности. В течение последних 6 лет в рамках Алуштинской конференции работает Совещание по электрическим полям в токамаках и стеллараторах.

Результаты экспериментальных исследований электрических полей, их стационарных значений и осциллирующих компонент, проведенных в последнее время, приведены в обзорах [3, 4, 5]. Экспериментальное исследование электрических полей в термоядерной плазме представляет собой трудную задачу. Применение электрических зондов ограничено

придиафрагменной областью. Спектроскопические методы измерения скорости вращения плазмы требуют не только сложной техники, но и определенных допущений при интерпретации измерений. Таким образом, диагностические возможности для исследования электрического поля весьма ограничены. Наиболее прямым методом измерений потенциала в горячей плазме является зондирование пучками тяжелых ионов (Heavy Ion Beam Probing – HIBP) [6].

Настоящая работа посвящена развитию диагностического метода HIBP, и исследованию с его помощью электрического потенциала и турбулентности плазмы в токамаках ТМ-4, Т-10 и стеллараторе ТЖ-II.

Целью настоящей работы является исследование электрического потенциала и турбулентности в термоядерной плазме, описание свойств его стационарной и осциллирующей компонент, поиск взаимосвязи между электрическим потенциалом и удержанием плазмы.

Исходя из этой цели, решались следующие основные задачи по изучению электрического потенциала:

- Разработка диагностической аппаратуры для зондирования плазмы пучком тяжелых ионов, применимой к условиям современных термоядерных установок Т-10 и ТЖ-II.
- Развитие диагностического метода HIBP, применение его для исследования потенциала плазмы и характеристик турбулентности в условиях современных термоядерных установок Т-10 и ТЖ-II.
- Исследование пространственно-временной структуры потенциала, определение его характерных масштабов;
- Исследование квазикогерентных и широкополосных колебаний потенциала и плотности плазмы
- Исследование турбулентного потока частиц в горячей зоне плазмы.

Связь с планом научно-исследовательских работ. Диссертация выполнена в соответствии с планом научно-технических работ ИФТ по направлению: «термоядерный синтез» и в поддержку ФЦП «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года».

Научная новизна состоит в том, что:

1. Созданы комплексы диагностической аппаратуры для зондирования плазмы пучками тяжелых ионов на установках Т-10 и ТЖ-II, позволившие впервые провести одновременные измерения осцилляций электрического потенциала, плотности и полоидального магнитного поля, а также сравнительный анализ поведения потенциала в токамаке и стеллараторе.
2. На ТЖ-II впервые в тороидальных установках проведены измерения турбулентного потока частиц в основной плазме.
3. Впервые исследованы геодезические акустические моды (ГАМ) в режимах с ЭЦР нагревом, обнаружены сателлиты. Амплитуда колебаний потенциала для ГАМ в режимах с ЭЦР нагревом может превышать 100 В. На Т-10 ГАМ имеют предел по плотности и некоторую магнитную компоненту.
4. Впервые на токамаках обнаружены дальние корреляции плотности и потенциала для ГАМ, установлен глобальный характер ГАМ.
5. Впервые установлен перемежаемый (вспышечный) характер ГАМ и модуляция их амплитуды и частоты пилообразными колебаниями.
6. Впервые в тороидальной плазме непосредственно наблюдались колебания электростатического потенциала и E_{pol} в диапазоне альфвеновских собственных мод (АЕ); $\Delta\phi_{AE} \sim 10$ В, $\Delta E_{pol} \sim 10$ В/см. Впервые с помощью НВР измерены полоидальные номера мод и скорости полоидального вращения для АЕ, возбуждаемых в горячей зоне плазмы и исследован вклад АЕ в электростатический поток частиц $\Gamma_{E \times B}$.
7. На ТЖ-II обнаружены новые типы неустойчивостей, а именно, моды, резонансные по плотности и моды, связанные с надтепловыми электронами, исследованы их свойства.

Теоретическое и практическое значение полученных результатов

Значение результатов диссертационной работы для прикладных задач и теории физики плазмы определяется тем, что работа направлена на решение проблемы, связанной с изучением общих свойств и закономерностей поведения электрического потенциала и турбулентности плазмы.

Полученные результаты:

1. могут быть использованы для измерения стационарных профилей и флуктуаций потенциала и плотности высокотемпературной плазмы тороидальных установок (токамаков и стеллараторов) методом зондирования пучком тяжелых ионов;
2. будут способствовать построению теоретических моделей, адекватно описывающих перенос частиц и перенос заряда в плазме, и могут быть использованы для теоретического моделирования и оценки процессов диффузии и теплопроводности в термоядерных установках;
3. могут найти применение в получении режимов с улучшенным удержанием плазмы;
4. могут найти применение для оценки влияния различных типов плазменных неустойчивостей, например собственных альфвеновских мод, на перенос частиц и энергии в плазме современных установок и в будущем термоядерном реакторе;

Кроме того, результаты диссертационной работы могут быть использованы для разработки новых образцов диагностической аппаратуры для зондирования плазмы современных термоядерных установок и будущего реактора.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Создание комплексов многоцелевой диагностической аппаратуры для зондирования плазмы пучками тяжелых ионов, позволивших провести уникальные измерения электрического потенциала и его осцилляций на установках Т-10 и ТЖ-II, а также турбулентного потока частиц на ТЖ-II.

2. Экспериментальное доказательство наличия общих свойств потенциала в плазме трех установок, круглых токамаков ТМ-4 и Т-10, и стелларатора с пространственной осью ТЖ-II, несмотря на существенные различия в их магнитных конфигурациях, а именно:
- a) Масштаб нескольких сотен вольт.
 - b) В режимах с низкой плотностью ($\bar{n}_e < 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) потенциал имеет положительный знак и величину от 0 до +1.2 кВ на стеллараторе ТЖ-II, от 0 до +0.2 кВ на периферии токамака ТМ-4.
 - c) В режимах с $\bar{n}_e > 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ потенциал имеет отрицательный знак и величину от 0 до -0.6 -1.2 кВ на всех трех установках, несмотря на различные методы нагрева: омический в ТМ-4, омический и ЭЦР в Т-10, ЭЦР и/или инжекционный в ТЖ-II. Среднее E_r также имеет один масштаб, $E_r \leq -100 \text{ В/см}$.
 - d) Рост n_e и связанный с ним рост τ_E вызывает изменение $\phi(\rho)$ и E_r в отрицательную сторону.
 - e) Ввод дополнительной ЭЦР мощности, связанный с ним рост T_e и падение τ_E вызывает изменение $\phi(\rho)$ и E_r в положительную сторону.
 - f) Таким образом, большой отрицательный потенциал и большее отрицательное электрическое поле характеризуют режимы с лучшим удержанием в исследованных тороидальных установках.
3. Идентификация и исследование свойств геодезических акустических мод (ГАМ) на токамаке Т-10. ГАМ, в основном, проявляются на потенциале плазмы $\Delta\phi_{\text{ГАМ}} \sim 20\text{-}100 \text{ В}$, и гораздо менее заметны на флуктуациях плотности. Частота ГАМ в эксперименте $f_{\text{ГАМ}} \sim T_e^{1/2}$, что соответствует теоретической зависимости для ГАМ с точностью до множителя порядка единицы. На Т-10 ГАМ имеют предел по плотности и некоторую магнитную компоненту. Впервые исследованы ГАМ в режимах с ЭЦР нагревом, обнаружены сателлиты. Амплитуда колебаний потенциала для ГАМ в режимах с ЭЦР нагревом может превышать 100 В. Впервые на токамаках обнаружены дальние корреляции плотности и потенциала для

ГАМ, установлен глобальный характер ГАМ. Впервые установлен перемежаемый (вспышечный) характер ГАМ и модуляция их амплитуды и частоты пилообразными колебаниями.

4. Экспериментальное обнаружение и исследование свойств альфвеновских мод в стеллараторе TJ-II в режиме с инжекционным нагревом. Показано, что $\Delta\varphi_{AE} \sim 10$ В, АЕ видны на всех трех параметрах, регистрируемых НІВР: потенциале, плотности и B_{pol} , эти три величины обладают высокой когерентностью и конечной кросс-фазой между собой. Различные ветви АЕ, наблюдаются НІВР с высоким пространственным (~ 1 см) и частотным (< 5 кГц) разрешением в диапазоне частот $50 < f_{AE} < 350$ кГц. Для каждой ветви определена ее пространственная локализация. Впервые в тороидальной плазме непосредственно наблюдались колебания электростатического потенциала и E_{pol} в диапазоне АЕ; $\Delta\varphi_{AE} \sim 10$ В, $\Delta E_{pol} \sim 10$ В/см. Впервые с помощью НІВР измерены полоидальные номера мод и скорости вращения для АЕ, возбуждаемых в горячей зоне плазмы и исследован вклад АЕ в электростатический поток частиц $\Gamma_{E \times B}$. Показано, что вклад АЕ в турбулентный поток частиц $\Gamma_{E \times B}^{AE}$ для разных ветвей АЕ может быть направлен как наружу, так и внутрь, или вообще отсутствовать, в зависимости от фазового соотношения между колебаниями E_{pol} и плотности. Как правило, $\Gamma_{E \times B}^{AE}$ направлен наружу, его величина для различных ветвей АЕ значительно различается от пренебрежимо низкого уровня до значения, сравнимого с потоком, вызванным широкополосной турбулентностью. Сравнение с численными МГД расчетами показало, что некоторые наиболее сильно выраженные ветви можно идентифицировать как НАЕ (винтовые) моды.
5. Экспериментальное обнаружение и исследование свойств нового типа неустойчивости, связанной с надтепловыми электронами, в стеллараторе TJ-II в режиме с ЭЦР-нагревом (ECRH/ECCD) при чрезвычайно низкой плотности плазмы ($n_e = (0.2—0.5) \times 10^{19}$ м⁻³). Показано, что каждая ветвь

этой моды имеет амплитуду $\Delta\varphi^{\text{EM}} \sim 20\text{ В}$, конечную радиальную ширину, низкое модовое число ($m \leq 5$) и одинаковую угловую фазовую скорость полоидального вращения $\Omega_{E \times B}^{\text{phase}} = 8 \times 10^4$ [рад/с], направленную в сторону электронного диамагнитного дрейфа. Вклад моды в турбулентный поток частиц $\Gamma_{E \times B}$ для наблюдаемых волновых векторов $k_\theta < 3 \text{ см}^{-1}$ оказался малым по сравнению с вкладом широкополосной турбулентности.

6. Экспериментальное обнаружение и исследование свойств нового типа неустойчивости – моды, резонансные по плотности, на стеллараторе TJ-II. Показано, что мода проявляется в виде сильной (до 100%) модуляции локальной плотности плазмы на наружном склоне ее радиального профиля, ($0.5 < \rho < 0.9$) и возбуждается только при определенных значениях плотности плазмы $\bar{n}_e = 0.6, 1.7, 2.7, 3.6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.
7. Экспериментально установлено, что режимы с улучшенным удержанием, вызванным краевой поляризацией (подачей напряжения на лимитер в TJ-II или на электрод в T-10) характеризуются формированием сильного краевого поля E_r и подавлением широкополосных колебаний потенциала и плотности. В режимах с самопроизвольным (TJ-II) и вынужденным (T-10) улучшенным удержанием, широкополосная турбулентность подавлялась не только на краю, но и в основной плазме, что свидетельствует о глобальном изменении турбулентного транспорта. Таким образом, обнаружена связь между величиной электрического потенциала, формированием краевого слоя с сильным отрицательным E_r , подавлением турбулентности, увеличением плотности плазмы и временем удержания энергии.

Апробация работы. Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XII и XIII Международных конгрессах по физике плазмы (Ницца, 2004, Киев, 2006); 20 и 21 Международных технических совещаниях МАГАТЭ по физике быстрых

частиц, (2010, Киев, 2011, Остин); 12, 13 и 18 Американских конференциях по диагностике плазмы (Рочестер, 1994, Монтеррей, 1996, Туксон, 2004); Международных технических совещаниях МАГАТЭ по исследованиям на малых термоядерных установках (Прага, 1996, Каир, 1998, Мехико, 2005, Лиссабон 2007); 7 Международном симпозиуме по термоядерным технологиям (Лиссабон, 1996); Международных конференциях по физике плазмы и УТС (Алушта, 2004, 2006, 2008, 2010); 10, 19, 20 и 21 Международных Токи конференциях по физике плазмы и УТС (Токи, 2001, 2009, 2010, 2011); 2-12 Международных совещаниях по роли электрических полей в удержании плазмы (Маастрихт, 1999, Монтре, 2002, Санкт-Петербург, 2003, Ницца, 2004, Таррагона, 2005, Рим, 2006, Варшава, 2007, Херсонес, 2008, София, 2009, Дублин, 2010); 14 и 15 Международных совещаниях по физике стеллараторов (2003, Грейфсвальд; 2005, Мадрид); 23, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 и 37 Европейских конференциях по физике плазмы и УТС (Киев, 1996, Маастрихт, 1999, Будапешт, 2000, Монтре, 2002, Санкт-Петербург, 2003, Лондон, 2004, Таррагона, 2005, Рим, 2006, Варшава, 2007, Херсонес, 2008, София, 2009, Дублин, 2010); XX Международной конференции МАГАТЭ по термоядерной энергетике (Виламура, 2004, xxx, 2006, Женева, 2008, Даеджон, 2010); XXIV – XXXVII Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород, 1997-2010), на 9 Европейско-американском рабочем совещании по транспорту (Кордоба, Испания 2010), на XXIII Российско-германском совещании по электронно-циклотронному излучению и ЭЦР нагреву (Н. Новгород-Москва 2010), на научном семинаре стелларатора LHD (Токи, Япония, 2009-2010), на научном семинаре стелларатора Heliotron-J (Киото, Япония, 2010), на научном семинаре стелларатора Wendelstein -7X (Грейфсвальд, Германия 2007-2009), на научном семинаре отделения физики плазмы исследовательского центра СИМАТ (Мадрид, Испания, 1992-2010), на научных семинарах отделения физики плазмы Национального научного центра «Харьковский Физико-технический институт» (Харьков, Украина, 1991-2010), на научном семинаре

токамака ISTTOK (Лиссабон, Португалия, 2006), на научном семинаре токамака TEXTOR (Юлих, Германия, 1998), на научном семинаре токамака TCV (Лозанна, Швейцария, 2004-2006).

Диссертация в целом и ее отдельные части докладывались на семинарах в НИЦ «Курчатовский институт».

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 43 работах, из которых 42 в реферируемых журналах, в том числе в ведущих иностранных журналах и отечественных журналах из списка ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 279 страниц, включая 180 рисунков, 9 таблицы и список литературы из 237 наименований.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава I посвящена краткому обзору литературы, описанию диагностического метода зондирования плазмы пучком тяжелых ионов и описанию диагностических комплексов на установках ТМ-4, Т-10, ТЖ-II, с помощью которых получены основные результаты работы.

В § 1 описывается принцип работы диагностики, приводятся математические соотношения для связи между измеряемыми характеристиками пучка и исследуемыми параметрами плазмы, а также постановка задачи оптимизации схемы зондирования, методы ее решения и результаты для некоторых установок. Показано, что НИВР является не только уникальной диагностикой для исследования электрического потенциала плазмы, но и многоцелевой диагностикой для одновременного исследования потенциала, плотности и поля тока плазмы и их колебаний.

В § 2 описывается высоковольтная аппаратура, примененная в диагностике для зондирования плазмы пучком тяжелых ионов.

В § 3 описывается современное состояние диагностического комплекса НІВР на токамаке Т-10, особенности его работы, связанные с сильным тороидальным сносом пучка, и методы получения радиальных распределений потенциала.

§ 4 посвящен описанию диагностического комплекса НІВР на стеллараторе ТЈ-II. Описана действующая аппаратура и особенности ее работы, связанные с трехмерной структурой траекторий в стеллараторе, методы получения «длинных» радиальных распределений потенциала от стороны слабого поля до стороны сильного поля. Основные параметры установок и диагностики НІВР приведены в таблице 1.

Таким образом, на установках Т-10 и ТЈ-II были созданы комплексы многоцелевой диагностической аппаратуры для зондирования плазмы пучками тяжелых ионов, позволяющие проводить уникальные измерения профилей электрического потенциала, а также его осцилляций и турбулентного потока частиц (ТЈ-II) практически не имея ограничений по режимам работы установок ($\bar{n}_e < 4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$).

Таблица 1.

параметр\установка	ТМ-4	ТЈ-II	Т-10
R , м	0.53	1.5	1.5
a_{lim} , м	0.085	0.22	0.3
B_t , Тл	1.2-2.0	1.0	1.5 - 2.5
\bar{n}_e , 10^{19} м^{-3}	0.6 – 4	0.3 – 6	1 - 4
P_{ECRH} , МВт	-	≤ 0.6	≤ 1.6
P_{NBI} , МВт	-	≤ 0.9	-
Диагностика НІВР			
E_{beam} , кэВ	100	125	300
тип зондир. ионов	Cs+	Cs+	Tl+
исследуемая область	$0 < \rho < 1$	$-1 < \rho < 1$	$+0.2 < \rho < 1$

Глава II посвящена исследованию свойств радиальных профилей потенциала в токамаках ТМ-4 и Т-10, и в стеллараторе ТJ-II.

В §1 описаны условия проведения экспериментов в омических режимах токамака ТМ-4 и приведены основные экспериментальные результаты: зависимость потенциала от плотности плазмы, от положения шнура по вертикали и от величины продольного магнитного поля. Показано, что более сильный отрицательный потенциал и отрицательное поле E_r связаны с улучшением удержания.

В §2 описаны условия проведения экспериментов на токамаке Т-10 в режимах с омическим и ЭЦР нагревом плазмы и приведены результаты измерений стационарных профилей потенциала. Рассмотрен широкий набор режимов, практически полностью охватывающий операционные пределы работы Т-10, от омических режимов с низкой плотностью и низким магнитным полем до режимов с высокой плотностью и большим магнитным полем с омическим и мощным дополнительным СВЧ-нагревом плазмы. Пример эволюции профиля потенциала плазмы при включении нецентрального СВЧ-нагрева приведен на рисунке 1 (а). Также приведены результаты вычисления скорости дрейфового вращения плазмы в скрещенных полях V_{ExB} и сравнения ее со скоростью вращения широкополосной дрейфовой турбулентности V_{TURB} , измеренной корреляционным рефлектометром. Показано, что при СВЧ-нагреве вращение замедляется, величина потенциала уменьшается и электрическое поле ослабляется, что сопровождается ухудшением удержания.

В §3 описаны условия проведения экспериментов на стеллараторе ТJ-II, рассмотрены режимы с ЭЦР и инжекционным нагревом, в том числе: режимы с низкой плотностью и центральным ЭЦР нагревом, с модуляцией СВЧ-мощности, СВЧ-режимы с различными магнитными конфигурациями, Режимы с ЭЦР и инжекционным нагревом. Также исследована эволюция профиля потенциала в режимах с центральным и нецентральным ЭЦР нагревом и режимы с литиезацией стенок камеры. Пример эволюции

профиля потенциала плазмы в режиме с ЭЦР и инжекционным нагревом приведен на рисунке 1 (б). Виден переход от положительного профиля потенциала к отрицательному через промежуточное состояние в виде «сомбреро». Область отрицательного потенциала начинает формироваться на периферии плазмы при $n_e > 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

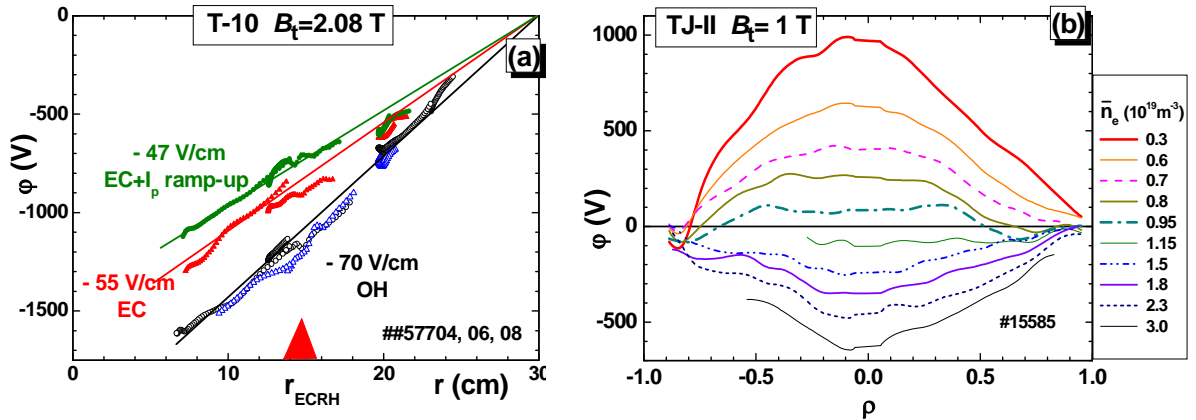


Рис 1. а) Эволюция профиля потенциала в режиме с Омическим и ЭЦР-нагревом, \blacktriangle – положение ЭЦ резонанса, $\bar{n}_e = 2.4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $E_{\text{НИВР}} = 200, 250, 300 \text{ кэВ}$,

б) Эволюция профиля потенциала в режиме с инжекционным и ЭЦР-нагревом, $E_{\text{НИВР}} = 125 \text{ кэВ}$.

Показано, что, несмотря на существенные различия в топологии удерживающего магнитного поля токамака и стелларатора, в поведении потенциала выявлены важные схожие черты, такие как близкие абсолютные значения потенциала ϕ и электрического поля E_r в трех установках и одинаковый характер зависимости от электронной температуры и плотности. Эти результаты показывают важность ϕ and E_r для формирования механизмов удержания плазмы: более отрицательные значения соответствуют лучшему удержанию в T-10 и TJ-II.

В главе III приводятся результаты исследований квазикогерентных колебаний потенциала и плотности в токамаке T-10 и стеллараторе TJ-II.

В §1 описаны методы обнаружения и результаты исследования свойств геодезических акустических мод (ГАМ) на T-10. Пример эволюции спектра осцилляций потенциала плазмы в режиме с ЭЦР нагревом и подъемом тока в T-10 приведен на рисунке 2 (а). Пики на спектре идентифицированы как ГАМ и их спутники.

В §2 описаны методы обнаружения и результаты исследования собственных альфвеновских мод на TJ-II. На рис. 2 (b) представлен пример колебаний электрического поля на частоте альфвеновских мод в TJ-II.

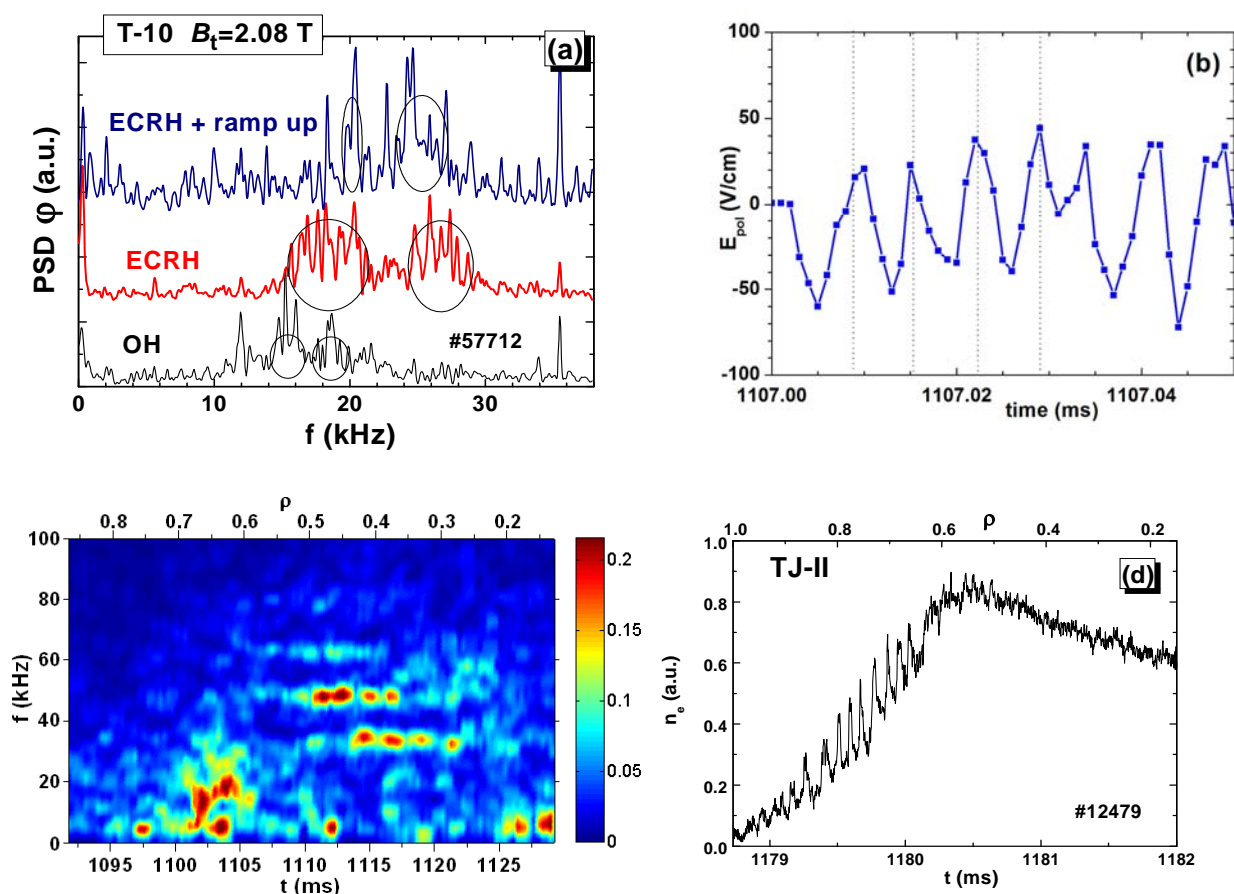


Рис. 2. а) Эволюция ГАМ на T-10 в режиме с Омическим и ЭЦР-нагревом и подъемом тока, б) Колебания полоидального электрического поля, вызванные альфвеновскими модами, TJ-II, в) Радиальная структура колебаний плотности плазмы, вызванных надтепловыми электронами в

режиме с ЭЦР-нагревом, $\bar{n}_e = 0.4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, d) Колебания плотности плазмы, резонансные по \bar{n}_e , в режиме с ЭЦР-нагревом, $\bar{n}_e = 0.6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

В §3 описаны методы обнаружения и исследования мод колебаний, порожденных надтепловыми электронами на ТЖ-II. Спектрограмма колебаний плотности плазмы, вызванных надтепловыми электронами в режиме с ЭЦР-нагревом на ТЖ-II показана на рис. 2 (с).

В §4 описаны методы обнаружения и исследования мод колебаний, резонансных по плотности на ТЖ-II. На рис. 2(d) приведен радиальный профиль плотности плазмы, на котором видны резонансные колебания.

В главе IV исследуется эволюция потенциала плазмы в режимах с переходами к улучшенному удержанию в Т-10 и ТЖ-II.

В §1 исследована эволюция потенциала плазмы в режимах с поляризацией периферии, а именно, подачей потенциала на электрод в Т-10 и подачей потенциала на лимитер в ТЖ-II.

В §2 рассмотрена эволюция потенциала плазмы в режимах со спонтанными L-H и H-L переходами на ТЖ-II. Подробно исследована эволюция профиля потенциала и динамика локального потенциала, а также эволюция колебаний потенциала и плотности плазмы в этих режимах. Кроме того, впервые на стеллараторах проведены измерения турбулентного потока частиц $\Gamma_{E \times B}$ в горячей зоне плазмы. Показано, что величина турбулентного потока сравнима в величине с полным потоком частиц, следовательно, $\Gamma_{E \times B}$ играет существенную роль в материальном балансе. Эволюция глобальных параметров плазмы и характеристик плазменных колебаний в режиме со спонтанными L-H и H-L переходами на ТЖ-II приведена на рис 3. Переход в режим с улучшенным удержанием характеризуется подавлением широкополосных колебаний потенциала и плотности плазмы, а также снижением $\Gamma_{E \times B}$ не только на периферии плазмы, но и в ее центральной, горячей области.

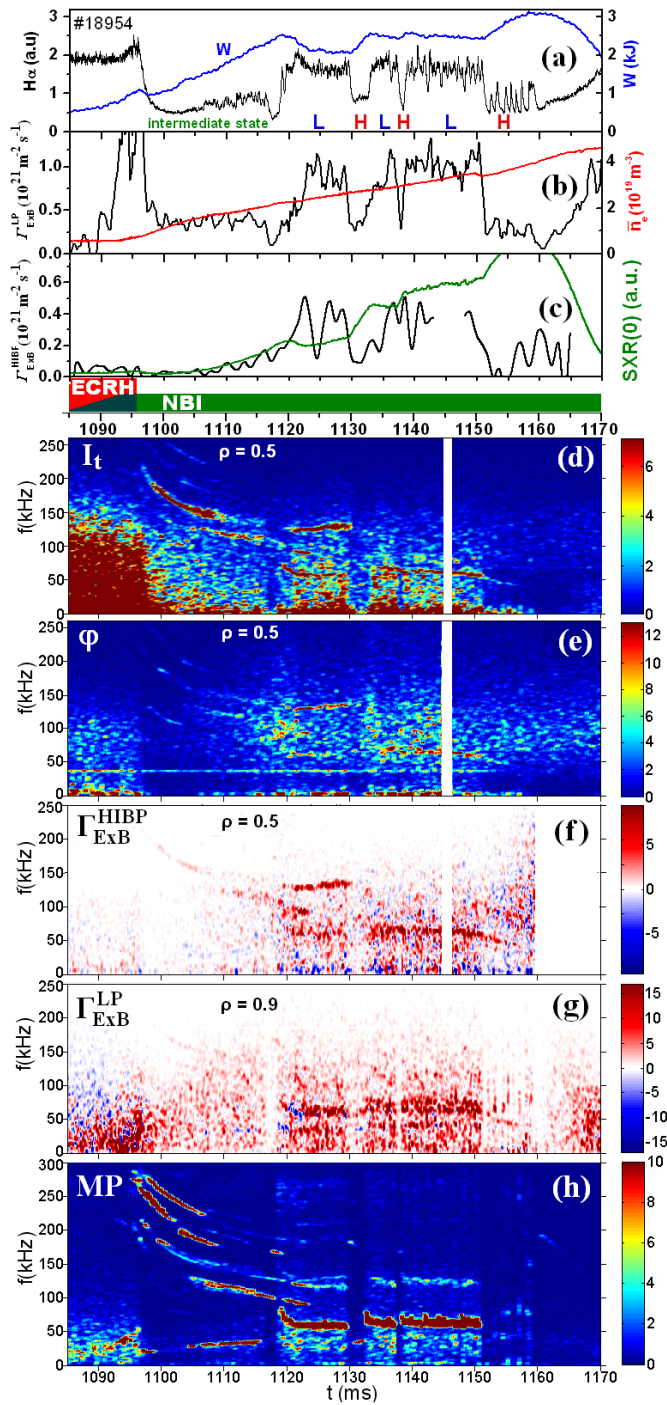


Рис. 3. Временная эволюция разряда со спонтанными L-N и N-L переходами на TJ-II; (a) Запасенная энергия плазмы W_{dia} , и свечение линии H_{α} ; (b) Центральная среднехордовая плотность \bar{n}_e и поток Γ_{LP} , измеренный зондом Ленгмюра; (c) поток Γ_{HIBP} , измеренный НІВР на $\rho = -0.5$ и интенсивность мягкого рентгеновского излучения SXR, спектрограмма мощности колебаний I_t , или n_e , (d) и потенциала (e). Спектрограмма турбулентного потока Γ_{ExB} , измеренная НІВР, $k_{\theta} < 2 \text{ см}^{-1}$ (f) и ленгмюровским зондом, $k_{\theta} < 10 \text{ см}^{-1}$ (g); спектрограмма мощности колебаний сигнала магнитного зонда (h). «Мертвый» период НІВР показан белой полосой. Широкополосные колебания плотности, потока и магнитного поля подавляются в N-моду. На (h) заметны квазикогерентные собственные альфвеновские моды.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

В ходе исследования была диагностическая методика зондирования плазмы пучками тяжелых ионов была усовершенствована и применена на современных термоядерных установках Т-10 и ТЖ-II, для которых создана высоковольтная диагностическая аппаратура. С помощью этой методики был изучен ряд плазменных режимов на токамаках ТМ-4, Т-10 и стеллараторе ТЖ-II и получены следующие выводы.

1. На установках Т-10 и ТЖ-II были созданы работоспособные комплексы многоцелевой диагностической аппаратуры для зондирования плазмы пучками тяжелых ионов, позволяющие проводить уникальные измерения профилей электрического потенциала, а также осцилляций плотности, электрического потенциала, полоидального магнитного поля и турбулентного потока частиц, практически не имея ограничений по режимам работы установки.

2. Несмотря на существенные различия в магнитных конфигурациях круглых токамаков ТМ-4 и Т-10 и стелларатора с пространственной осью ТЖ-II, потенциал в плазме всех трех установок имеет важные общие свойства:

- 1) Масштаб нескольких сотен вольт.
- 2) В режимах с низкой плотностью ($\bar{n}_e < 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) потенциал имеет положительный знак и величину от 0 до +1.2 кВ на стеллараторе ТЖ-II, от 0 до +0.2 кВ на периферии токамака ТМ-4.
- 3) В режимах с $\bar{n}_e > 1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ потенциал имеет отрицательный знак и величину от 0 до - 0.6 - 1.2 кВ на всех трех установках, несмотря на различные методы нагрева: омический в ТМ-4, омический и ЭЦР в Т-10, ЭЦР и/или инжекционный в ТЖ-II. Среднее \bar{E}_r также имеет один масштаб, $\bar{E}_r = 0 \div -100 \text{ В/см}$.
- 4) В рассмотренных режимах не найдено зависимости электрического потенциала от магнитной конфигурации.
- 5) Дрейфовое полоидальное вращение плазмы V_{ExB} , вызванное

отрицательным электрическим полем, направлено в сторону электронного диамагнитного дрейфа, оно неоднородно по радиусу и имеет масштаб нескольких километров в секунду. В пределах точности эксперимента, широкополосная дрейфовая турбулентность вращается и со скоростью V_{ExB} и в том же направлении (Т-10).

- 6) Рост n_e и связанный с ним рост τ_E вызывает изменение $\phi(\rho)$ и E_r в отрицательную сторону.
- 7) Ввод дополнительной ЭЦР мощности, связанный с ним рост T_e и падение τ_E вызывает изменение $\phi(\rho)$ и E_r в положительную сторону.
- 8) Таким образом, большой отрицательный потенциал и большее отрицательное электрическое поле характеризуют режимы с лучшим удержанием в исследованных тороидальных установках.

3. На токамаке Т-10 обнаружены геодезические акустические моды (ГАМ). Они имеют следующие свойства:

- 1) спектры плотности мощности $\Delta\phi$ выглядят как узкий доминирующий когерентный пик, лежащий в интервале между 9 и 33 кГц, с высокой контрастностью к шумовому фону. Частота ГАМ зависит от электронной температуры как $T_e^{1/2}$. Абсолютное значение частоты близко к теоретическому с точностью до множителя порядка единицы.
- 2) ГАМ в основном проявляются на потенциале плазмы $\Delta\phi_{\text{ГАМ}} \sim 20-100$ В, и гораздо менее заметны на флуктуациях плотности. Они являются глобальной модой с полоидальным модовым числом $m=0$ и короткой радиальной длиной корреляции, порядка нескольких см.

Помимо вышеуказанных свойств, предсказанных теорией, на Т-10 впервые обнаружены следующие характеристики ГАМ:

- 1) ГАМ имеют тенденцию к возбуждению (увеличению амплитуды) при ЭЦР нагреве;
- 2) ГАМ могут иметь дополнительный сателлитный пик с более высокой частотой (22-28 кГц);

- 3) Амплитуда и частота ГАМ имеют вспыхивающий характер;
- 4) ГАМ имеют предел по плотности;
- 5) ГАМ имеют тенденцию к возбуждению вблизи магнитных поверхностей с низкими рациональными значениями q ;
- 6) Хотя ГАМ являются в основном электростатическими модами, они могут также иметь и некоторую магнитную компоненту.

4. Зондирование пучком тяжелых ионов (НІВР) разработано как новая диагностика для прямого изучения альфвеновских собственных мод (АЕ) в центральной зоне плазмы. При инжекционном нагреве плазмы в стеллараторе ТЈ-II обеспечиваются экспериментальные условия для изучения свойств АЕ этой новой мощной диагностикой.

В результате исследования установлено:

- 1) Альфвеновские моды в стеллараторе ТЈ-II, возникающие при инжекционном нагреве, видны на всех трех параметрах, регистрируемых НІВР: потенциале, плотности и V_{pol} , за счет их собственных электрических и магнитных полей, а также колебаний давления (плотности); все эти три величины обладают высокой когерентностью и конечной кросс-фазой между собой, хотя частота АЕ сильно меняется за счет изменения плотности.
- 2) Различные ветви АЕ, возбуждаемых быстрыми частицами, наблюдаются НІВР с высоким пространственным (~ 1 см) и частотным (< 5 кГц) разрешением в диапазоне частот $50 < f_{AE} < 350$ кГц.
- 3) АЕ, вызванные инжекционным нагревом в стеллараторе ТЈ-II, характеризуются колебаниями электрического потенциала порядка 10 В, и колебаниями E_{pol} порядка 10 В/см. Впервые в тороидальной плазме непосредственно наблюдались колебания электростатического потенциала и E_{pol} в диапазоне АЕ.
- 4) Впервые с помощью НІВР измерены полоидальные номера мод и скорости вращения для АЕ, возбуждаемых в горячей зоне плазмы. Показано, что

ветви АЕ могут вращаться полоидально в направлении как электронного, так и ионного дрейфа. Скорость полоидального вращения падает с ростом плотности.

- 5) Исследован вклад АЕ в турбулентный поток частиц. Показано, что поток может быть направлен как наружу, так и внутрь, или вообще отсутствовать, в зависимости от фазового соотношения между колебаниями E_{pol} и плотности. Как правило, поток частиц, вызванный АЕ, направлен наружу, его величина для различных ветвей АЕ значительно различается от пренебрежимо низкого уровня до значения, сравнимого с потоком, вызванным широкополосной турбулентностью.
 - 6) Сравнение с численными МГД расчетами показало, что некоторые наиболее сильно выраженные ветви можно идентифицировать как НАЕ (винтовые) моды, сцепленные с GAE (глобальными) модами.
5. На стеллараторе TJ-II, в разрядах с нагревом и генерацией тока на второй гармонике (ECRH/ECCD) при низкой плотности наблюдалась собственная мода (EM), возбуждаемая надтепловыми электронами. EM, является плазменным колебанием нового типа, имеющим следующие особенности:
- 1) EM возбуждается при низкой плотности плазмы ($n_e = (0.2 - 0.5) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) и нецентральном ECRH или центральном ECRH/ECCD, когда образуется «хвост» надтепловых электронов. EM проявляется в виде набора квазимонохроматических ветвей (обычно трех: 33, 48, 60 кГц) на потенциале и плотности плазмы, имеющих постоянный частотный сдвиг $\Delta f = 13-15$ кГц. Частота EM растет с мощностью ECR нагрева. Типичная амплитуда колебаний потенциала для моды составила $\Delta \phi^{EM} \sim 20 \text{ В}$.
 - 2) Мода локализована в области $\rho < 0.6$. Мода имеет зональную структуру: различные ветви моды имеют индивидуальные радиальные зоны и конечную радиальную ширину порядка нескольких см, $\Delta \rho \sim 0.2$.
 - 3) Мода имеет электростатическую природу, ее возмущения потенциала и плотности удовлетворяют соотношению Больцмана.

- 4) Ветви моды имеют малое нечетное ($m \leq 5$) число и одинаковые угловые фазовые скорости полоидального вращения в диапазоне 8×10^4 рад/с в направлении электронного диамагнитного дрейфа.
- 5) Вклад моды в турбулентный поток частиц мал по сравнению с вкладом широкополосной турбулентности в том же частотном интервале.

5. На стеллараторе TJ-II обнаружен новый тип квазикогерентных колебаний плазмы, мода, резонансная по плотности. Она имеет следующие особенности:

- 1) Мода проявляется в виде сильной (до 100%) модуляции локальной плотности плазмы на наружном склоне ее радиального профиля, ($0.9 < \rho < 0.5$). Она показывает высокую когерентность между сигналом плотности НВР и сигналами магнитных и ленгмюровских зондов.
- 2) Характерная частота моды $f = 20-30$ кГц. $f \sim T_i^{1/2}$, что характерно для акустических мод.
- 3) Мода возбуждается только при определенных значениях плотности плазмы $\bar{n}_e = 0.6, 1.7, 2.7, 3.6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

6. Изучение режимов с улучшенным удержанием, вызванным подачей напряжения в токамаке T-10 и стеллараторе TJ-II показало:

- 1) Подача напряжения меняет как параметры краевой плазмы, так и глобальное удержание, тем самым показывая, что радиальное электрическое поле непосредственно влияет на удержание плазмы в токамаке и стеллараторе.
- 2) На TJ-II впервые экспериментально показано, что плазменный шнур в стеллараторе с горячей, почти термоядерной плазмой заряжается как целое. Это происходит за короткое время (10 – 100) мкс, существенно меньшее энергетического. Затем потенциал плазмы падает вместе с одновременным ростом плотности за характерное время (1 – 10) мс.
- 3) Несмотря на заметные отличия в постановке экспериментов на T-10 и TJ-II, данные НВР имеют много общего: отклик потенциала $\Delta\phi$ имеет ту же

полярность и масштаб, как U_{bias} . В области электрода (лимитера) наблюдается подавление флуктуаций.

- 4) Другие особенности реакции плазмы на подачу напряжения отличаются: в ТJ-II меняется, как на краевой, так и центральный потенциал, а в Т-10 потенциал, в основном, меняется вблизи электрода.

7. Исследования потенциала в режимах со спонтанным переходом в улучшенное удержание, показали:

- 1) потенциал плазмы в H-моде более отрицателен, чем в L-mode (изменения $\Delta\phi$ от ~ -80 до -100 В) при $\rho < 0.9$;
- 2) профиль E_r в H-моде имеет локальный минимум от -100 до -150 В/см вблизи $\rho = 0.8 - 0.9$, который в 1.5-2 раза больше, чем локальное значение E_r в этой области в L-моде;
- 3) во время L-H / H-L переходов, профили электрического потенциала в центральной плазме изменяются от одной формы к другой синхронно со скачками турбулентности и свечения H_{α} ;
- 4) градиент плотности в области пьедестала H-моды в 2 раза больше, чем в L-моды при сравнимой средней плотности \bar{n}_e ;
- 5) при L-H переходе подавляются колебания электронной плотности и потенциала плазмы, что приводит к падению потока $\Gamma_{E \times B}$ в краевой (измеренного зондом LP) и в центральной плазме (измеренной НВР) до $\rho = 0.5$. подавление турбулентности происходит в широком частотном диапазоне вплоть до 250 кГц. После обратного H-L перехода, характеристики турбулентности L-моды восстанавливаются.
- 6) Одновременные изменения формы краевого пьедестала, запасенной энергии W_{dia} , потока нейтралов со стенки (интенсивности H_{α}) и потоков $\Gamma_{E \times B}$ в центральной и периферийной плазме при L-H и H-L переходах означает, что поток $\Gamma_{E \times B}$ играет важную роль в балансе энергии и частиц.
- 7) Подавление потока $\Gamma_{E \times B}$ почти по всему сечению плазмы происходит

одновременно с формированием сильного отрицательного краевого поля E_r . Это означает, что механизм, связанный с E_r , типа стабилизации широм полоидального вращения, может играть роль в формировании режима с улучшенным удержанием.

Основные результаты работы и положения, выносимые на защиту,
опубликованы в следующих работах:

- [1] Bugarya V.I., Gorshkov A.V., Grashin S.A., Ivanov I.V., Krupin V.A., Krupnik L.I., Nedzel'skij I.S., **Mel'nikov A.V.**, Razumova K.A., Sokolov Yu.A., and Trukhin V.M. Electric potential and toroidal and poloidal rotation velocities of a tokamak plasma // JETP Lett. (1983) V. 38, № 7, P. 404-408
- [2] Bugarya V.I., Gorshkov A.V., Grashin S.A., Ivanov I.V., Krupin V.A., **Mel'nikov A.V.**, Razumova K.A., Sokolov Yu.A., Trukhin V.M., Chankin A.V., Yushmanov P.N., Krupnik L.I., and Nedzel'skij I.S. Measurements of plasma column rotation and potential in the TM-4 Tokamak // Nucl. Fusion (1985) V. 25, No 12, p. 1707-1717
- [3] Bondarenko I.S., Krupnik L.I., Nedzel'skii I.S., and **Mel'nikov A.V.** Plasma probing with a heavy ion beam in the TM-4 tokamak // Sov. J. Tech. Phys. (1986) V. 31, P. 1390.
- [4] Днестровский Ю.Н., **Мельников А.В.** Определение профиля тока в плазме методом зондирования пучком тяжелых ионов // Физика плазмы (1986) Т. 12. № 6. С. 687
- [5] Днестровский Ю.Н., Крупник Л.И., **Мельников А.В.**, Недзельский И.С. Определение плотности плазмы методом зондирования пучками тяжелых ионов // Физика плазмы. (1986) Т. 12. №. 2. С. 223.
- [6] Bondarenko I.S., Gubarev S.P., Krupnik L.I., **Mel'nikov A.V.**, Nedzel'skii I.S., Utkin A.A., and Khrebtov S.M. Plasma diagnostics using a heavy-ion beam in the T-10 tokamak // Sov. J. Plasma Phys. (1992) V. 18, P. 110
- [7] Dnestrovskij Yu.N., **Melnikov A.V.**, Krupnik L.I. and Nedzelskij I.S. Development of heavy ion beam probe diagnostics // IEEE Trans. Plasma Sci. (1994) V. 22, No 4, p. 310-331
- [8] **Melnikov A.V.**, Tarasyan K.N., Vershkov V.A., Dreval V.A., Sushkov A.V., Lysenko S.E., Sannikov V.V., Gorshkov A.V., Krupnik L.I., Nedzelskij I.S., Kharchev N.K., Fomin G.A., and Mochalova L.A. Space and time evolution of plasma potential in T-10 under variation of main gas influx // IEEE Trans. Plasma Sci. (1994), V. 22, No 4, p. 363-368
- [9] **Melnikov A.V.**, Bondarenko I.S., Efremov S.L., Kharchev N.K., Khrebtov S.M., Krupnik L.I., Nedzelskij I.S., Zimeleva L.G., and Trofimenko Yu.V. HIBP diagnostics on T-10 // Rev. Sci. Instrum. (1995) V. 66, P. 317

- [10] **Melnikov A.V.** Development of heavy ion beam probe diagnostics // *Rev. Sci. Instrum.* (1995) V. 66, P. 320
- [11] **Melnikov A.V.**, Kharchev N.K., Eliseev L.G., Bondarenko I.S., Krupnik L.I., Khrebtov S.M., Nedzelskij I.S., and Yu.V. Trofimenko. Calibration of the heavy ion beam probe parallel plate analyzer using the gas target and reference beam // *Rev. Sci. Instrum.* (1997) V. 68, P. 308
- [12] Bondarenko I.S., Chmuga A.A., Dreval N.B., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachok A.S., Krupnik L.I., Coelho P., Cunha M., Gonçalves B., Malaquias A., Nedzelskiy I.S., Varandas C.A.F., Hidalgo C., Garcia-Cortes I., **Melnikov A.V.** Installation of an advanced heavy ion beam diagnostic on the TJ-II stellarator // *Rev. Sci. Instrum.* (2001) V. 72, P. 583
- [13] Van Oost G., Gunn J.P., **Melnikov A.**, Stöckel J. and Tendler M. The Role of Radial Electric Fields in the Tokamaks TEXTOR-94, CASTOR, and T-10 // *Czech. J. Phys.* (2001) V. 51, No 10, p. 957-975
- [14] Donné A.J.H., **Melnikov A.V.** and Van Oost G. Diagnostics for radial electric field measurements in hot magnetized plasma // *Czech. J. Phys.* (2002) V. 52, No 10, p. 1077-1096
- [15] Pedrosa M.A., Hidalgo C., McCarthy K.J., López-Sánchez A., Ochando M.A., Pastor I., Baciero A., Calderón E., Estrada T., Herranz J., López-Razola J., Milligen B.V., Tafalla D., Tabarés F., The TJ-II Team, Dreval N., Chmyga A., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachok A.S., Krupnik L., Eliseev L. and **Melnikov A.V.** Edge Turbulence During Limiter Biasing Experiments in the TJ-II Stellarator // *Czech. J. Phys.* (2003) V. 53, No 10, P. 877-885
- [16] Van Oost G., Adámek J., Antoni V., Balan P., Boedo J.A., Devynck P., Duran I., Eliseev L., Gunn J.P., Hron M., Ionita C., Jachmich S., Kirnev G.S., Martines E., **Melnikov A.V.**, Schrittwieser R., Silva C., Stöckel J., Tendler M., Varandas C., Van Schoor M., Vershkov V. and Weynants R.R. Turbulent transport reduction by $E \times B$ velocity shear during edge plasma biasing: recent experimental results // *Plasma Phys. Control. Fusion* (2003) V. 45, No 5, P. 621-643
- [17] Hidalgo C., Pedrosa M.A., Dreval N., McCarthy K.J., Eliseev L., Ochando M.A., Estrada T., Pastor I., Ascasíbar E., Calderón E., Cappa A., Chmyga A.A., Fernández A., Gonçalves B., Herranz J., Jiménez J.A., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachok A.S., Krupnik L., López-Fraguas A., López-Sánchez A., **Melnikov A.V.**, Medina F., van Milligen B., Silva C., Tabarés F. and Tafalla D. Improved confinement regimes induced by limiter biasing in the TJ-II stellarator // *Plasma Phys. Control. Fusion* (2004) V. 46, No 1, P. 287-297
- [18] **Melnikov A.V.**, Hidalgo C., Chmyga A.A., Dreval N.B., Eliseev L.G., Khrebtov S.M.,

- Komarov A.D., Kozachok A.S., Krupnik L.I., Pastor I., Pedrosa M.A., Perfilov S.V., McCarthy K., Ochando M.A., Van Oost G., Silva C., Goncalves B., Dnestrovskij Yu.N., Lysenko S. E., Ufimtsev M.V., Tereshin V.I. Plasma Potential Measurements by the Heavy Ion Beam Probe Diagnostic in Fusion Plasmas: Biasing Experiments in the TJ-II Stellarator and T-10 Tokamak // *Fusion Sci. Techn.* (2004) V. 46, P. 299-311
- [19] Bondarenko I.S., Chmyga A.A., Dreval N.B., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Eliseev L.G., **Melnikov A.V.**, and Perfilov S.V. Heavy ion beam injection systems for fusion plasma diagnostics // *Rev. Sci. Instrum.* (2004) V. 75, P. 1835
- [20] Estrada T., Alonso A., Chmyga A.A., Dreval N., Eliseev L., Hidalgo C., Komarov A.D., Kozachok A.S., Krupnik L., **Melnikov A.V.**, Nedzelskiy I.S., de Pablos J.L., Pereira L.A., Tashev Yu., Tereshin V. and Vargas I. Electron internal transport barriers, rationals and quasi-coherent oscillations in the stellarator TJ-II // *Plasma Phys. Control. Fusion* (2005) V. 47 No 11, P. L57-L63
- [21] **Melnikov A.V.**, Eliseev L.G., A.V. Gudozhnik, Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Zimeleva L.G., Ufimtsev M.V., Krupnik L.I. and Schoch P.M. Investigation of the plasma potential oscillations in the range of geodesic acoustic mode frequencies by heavy ion beam probing in tokamaks // *Czech. J. Phys.* (2005) V. 55, No 3, P. 349-360
- [22] **Melnikov A.V.**, Eliseev L.G., Grashin S.A., Gudozhnik A.V., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Vershkov V.A., Krupnik L.I., Chmyga A.A., Komarov A.D., Kozachok A.S., Hidalgo C., Alonso A., dePablos J.L., Pedrosa M.A. Study of the plasma potential evolution during ECRH in the T-10 tokamak and TJ-II stellarator // *Czech. J. Phys.* (2005) V. 55, No 12, P. 1569-1578
- [23] Vershkov V.A., Shelukhin D.A., Soldatov S.V., Urazbaev A.O., Grashin S.A., Eliseev L.G., **Melnikov A.V.** and the T-10 team. Summary of experimental core turbulence characteristics in ohmic and electron cyclotron resonance heated discharges in T-10 tokamak plasmas // *Nucl. Fusion* (2005) V. 45, No 10, P. S203-S226
- [24] Castejón F., Fujisawa A., Ida K., Talmadge J.N., Estrada T., López-Bruna D., Hidalgo C., Krupnik L. and **Melnikov A.V.** Influence of magnetic topology on transport and stability in stellarators // *Plasma Phys. Control. Fusion* (2005) V. 47 No 12B B53-B69
- [25] **Melnikov A.V.**, Vershkov V.A., Eliseev L.G., Grashin S.A., Gudozhnik A.V., Krupnik L.I., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Shelukhin D.A., Soldatov S.V., Ufimtsev M.V., Urazbaev A.O., Van Oost G. and Zimeleva L.G. Investigation of geodesic acoustic mode oscillations in the T-10 tokamak // *Plasma Phys. Control. Fusion* (2006) V. 48, No 4, P. S87-S110
- [26] Krupnik L., **Melnikov A.**, Hidalgo C., Chmyga A., Dreval N., Eliseev L., Estrada T.,

- Komarov A., Kozachok A., Perfilov S., Pedrosa M., Alonso A., and de Pablos J.L. Quasi-coherent Oscillations in the TJ-II Stellarator // AIP Conf. Proc. (2006) V. 875, P. 95
- [27] **Melnikov A.V.**, Alonso A., Ascasióbar E., Balbín R., Chmyga A.A., Dnestrovskij Yu.N., Eliseev L.G., Estrada T., J. Fontdecaba M., Fuentes C., Guasp J., Herranz J., Hidalgo C., Komarov A.D., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Liniers M., Lysenko S.E., McCarthy K.J., Ochando M.A., Pastor I., De Pablos J.L., Pedrosa M.A., Perfilov S.V., Petrov S.Ya., Tereshin V.I., TJ-II Team. Plasma Potential Evolution Study by HIBP Diagnostic During NBI Experiments in the TJ-II Stellarator // Fusion Sci. Techn. (2007) V. 51, N 1, P. 31-37
- [28] Fujisawa A., Ido T., Shimizu A., Okamura S., Matsuoka K., Iguchi H., Hamada Y., Nakano H., Ohshima S., Itoh K., Hoshino K., Shinohara K., Miura Y., Nagashima Y., Itoh S.-I., Shats M., Xia H., Dong J.Q., Yan L.W., Zhao K.J., Conway G.D., Stroth U., **Melnikov A.V.**, Eliseev L.G., Lysenko S.E., Perfilov S.V., Hidalgo C., Tynan G.R., Holland C., Diamond P.H., McKee G.R., Fonck R.J., Gupta D.K. and Schoch P.M. Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas // Nucl. Fusion (2007) V. 47, No 10, P. S718-S726
- [29] Van Oost G., Bulanin V.V., Donné A.J.H., Gusakov E.Z., Kraemer-Flecken A., Krupnik L.I., **Melnikov A.V.**, Nanobashvili S., Peleman P., Razumova K.A., Stöckel J., Vershkov V., Adamek J., Altukov A.B., Andreev V.F., Askinazi L.G., Bondarenko I.S., Brotankova J., Dnestrovskij A.Yu., Duran I., Eliseev L.G., Esipov L.A., Grashin S.A., Gurchenko A.D., Hogeweyj G.M.D., Hron M., Ionita C., Jachmich S., Khrebtov S.M., Kouprienko D.V., Lysenko S.E., Martines E., Perfilov S.V., Petrov A.V., Popov A.Yu., Reiser D., Schrittwieser R., Soldatov S., Spolaore M., Stepanov A.Yu., Telesca G., Urazbaev A.O., Verdoolaege G., Zacek F. and Zimmermann O. Multi-machine studies of the role of turbulence and electric fields in the establishment of improved confinement in tokamak plasmas // Plasma Phys. Control. Fusion (2007) V. 49, No 5A, P. A29-A44
- [30] Krupnik L.I., Komarov A.D., Kozachek A.S., **Melnikov A.V.**, Nedzelskiy I.S. High-intensity alkali ion sources for plasma diagnostics // IEEE Trans. Plasma Sci. (2008) V. 36, No 4, P. 1536-1544.
- [31] Dnestrovskij Yu.N., **Melnikov A.V.**, and Pustovitov V.D. Approach to canonical pressure profiles in stellarators // Plasma Phys. Control. Fusion (2009) V. 51 No 1, P. 015010 (10pp)
- [32] Sánchez J., Acedo M., Alonso A., Alonso J., Alvarez P., Ascasióbar E., Baciero A., Balbín R., Barrera L., Blanco E., Botija J., de Bustos A., de la Cal E., Calvo I., Cappa A., Carmona J.M., Carralero D., Carrasco R., Carreras B.A., Castejón F., Castro R., Catalán G., Chmyga A.A., Chamorro M., Eliseev L., Esteban L., Estrada T., Fernández A., Fernández-Gavilán R., Ferreira J.A., Fontdecaba J.M., Fuentes C., García L., García-Cortés I., García-Gómez R., García-Regaña J.M., Guasp J., Guimaraes L., Happel T., Hernanz J., Hidalgo C., Jiménez

- J.A., Jiménez-Denche A., Jiménez-Gómez R., Jiménez-Rey D., Kirpichev I., Komarov A.D., Kozachok A.S., Krupnik L., Lapayese F., Liniers M., López-Bruna D., López-Fraguas A., J. López-Rázola, López-Sánchez A., Lysenko S., Marcon G., Martín F., Maurin V., McCarthy K.J., F. Medina, M. Medrano, **Melnikov A.V.**, P. Méndez, B. van Milligen, E. Mirones, I.S. Nedzelskiy, Ochando M., Olivares J., de Pablos J.L., Pacios L., Pastor I., Pedrosa M.A., de la Peña A., Pereira A., Pérez G., Pérez-Risco D., Petrov A., Petrov S., Portas A., Pretty D., Rapisarda D., Rattá G., Reynolds J.M., Rincón E., Ríos L., Rodríguez C., Romero J.A., Ros A., Salas A., Sánchez M., Sánchez E., Sánchez-Sarabia E., Sarkisian K., Sebastián J.A., Silva C., Schchepetov S., Skvortsova N., Solano E.R., Soletto A., Tabarés F., Tafalla D., Tarancón A., Tashev Yu., Tera J., Tolkachev A., Tribaldos V., Vargas V.I., Vega J., Velasco G., Velasco J.L., Weber M., Wolfers G. and Zurro B. Confinement transitions in TJ-II under Li-coated wall conditions // *Nucl. Fusion* (2009) V. 49, No 10, P. 104018 (10pp)
- [33] Estrada T., Happel T., Eliseev L., D. López-Bruna, E. Ascasibar, E. Blanco, L. Cupido, Fontdecaba J.M., Hidalgo C., Jiménez-Gómez R., Krupnik L., Liniers M., Manso M.E., McCarthy K.J., Medina F., **Melnikov A.V.**, van Milligen B., Ochando M.A., Pastor I., Pedrosa M.A., Tabarés F.L., Tafalla D. and TJ-II Team. Sheared flows and transition to improved confinement regime in the TJ-II stellarator // *Plasma Phys. Control. Fusion* (2009) V. 51, No 12, P. 124015 (11pp)
- [34] Шурыгин Р.В., **Мельников А.В.** Турбулентная динамика винтовых возмущений в пристеночной плазме токамака Т-10 // *Физика плазмы* (2009) Т. 35, No 4, 291-302
- [35] **Melnikov A.V.**, Eliseev L.G., Jiménez-Gómez R., Ascasibar E., Hidalgo C., Chmyga A.A., Komarov A.D., Kozachok A.S., Krasilnikov I.A., Khrebtov S.M., Krupnik L.I., Liniers M., Lysenko S.E., Mavrin V.A., de Pablos J.L., Pedrosa M.A., Perfilov S.V., Ufimtsev M.V., Ido T., Nagaoka K., Yamamoto S., Tashev Yu.I., Zhezhera A.I. and Smolyakov A.I. Internal measurements of Alfvén eigenmodes with heavy ion beam probing in toroidal plasmas // *Nucl. Fusion* (2010) V. 50, P. 084023 (11 pp)
- [36] **Melnikov A.V.**, Eliseev L.G., R. Jiménez-Gómez, Ascasibar E., Hidalgo C., Chmyga A.A., Ido T., Khrebtov S.M., Könies A., Komarov A.D., Kozachek A.S., Krasilnikov I.A., Krupnik L.I., Liniers M., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Nagaoka K., Ochando M., de Pablos J.L., Pedrosa M.A., Perfilov S.V., Smolyakov A.I., Tashev Yu.I., Ufimtsev M.V., Yamamoto S., Zhezhera A.I. Study of Alfvén Eigenmodes in the TJ-II stellarator // *Plasma and Fusion Research* (2010) V. 5, P. S2019 (4 pp).
- [37] **Melnikov A.V.**, Vershkov V.A., Grashin S.A., Eliseev L.G., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Merezkin V.G., Perfilov S.V., Shelukhin D.A., Shurygin R.V., Krupnik L.I., Komarov A.D., Kozachek A.S., Zhezhera A.I. Study of plasma potential, its fluctuations and turbulence

- rotation in the T-10 tokamak // Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics (2010) № 6 (12) P. 40-42
- [38] Van Milligen B.Ph., Estrada T., Jiménez-Gómez R., **Melnikov A.**, Hidalgo C., Fontdecaba J.M., Krupnik L., Eliseev L.G., Perfilov S.V. and the TJ-II team. A global resonance phenomenon at the TJ-II stellarator // Nucl. Fusion (2011) V. 51, P. 013005
- [39] Weisen H., **Melnikov A.V.**, Perfilov S.V. and Lysenko S.E. On the possibility of using a heavy ion beam probe for local poloidal flux measurements in a tokamak // Fusion Sci. Techn. (2011) V. 59, No 2, P. 418-426.
- [40] **Melnikov A.**, Eliseev L., Ochando M., Nagaoka K., Ascasibar E., Cappa A., Castejon F., Hidalgo C., de Pablos J.L., Pedrosa M.A., S. Yamamoto, Oshima S., HIBP group and TJ-II team. A Quasi-Coherent Electrostatic Mode in ECRH Plasmas on TJ-II // Plasma and Fusion Research (2011) V. 6, P. 2402030
- [41] Jiménez-Gómez R., Könies A., Ascasibar E., Castejón F., Estrada T., Eliseev L.G., **Melnikov A.V.**, Jiménez J.A., Pretty D.G., Jiménez-Rey D., Pedrosa M.A., de Bustos A. and Yamamoto S., Alfvén eigenmodes measured in the TJ-II stellarator // Nucl. Fusion (2011) V. 51, P. 033001
- [42] **Melnikov A.V.**, Hidalgo C., Eliseev L.G., Ascasibar E., Chmyga A.A., Dyabilin K.S., Krasilnikov I.A., Krupin V.A., Krupnik L.I., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachek A.S., López-Bruna D., Lysenko S.E., Mavrin V.A., de Pablos J.L., Pastor I., Perfilov S.V., Pedrosa M.A., Shurygin R.V., Vershkov V.A., T-10 team and TJ-II team. Plasma potential and turbulence dynamics in toroidal devices (survey of T-10 and TJ-II experiments) // Nucl. Fusion (2011) V. 51, P. 083043 (10 pp)
- [43] Van Milligen B.Ph., Pedrosa M.A., Hidalgo C., Carreras B.A., Estrada T., Alonso J.A., de Pablos J.L., **Melnikov A.**, Krupnik L., Eliseev L.G. and Perfilov S.V. The dynamics of the formation of the edge particle transport barrier at TJ-II // Nucl. Fusion (2011) V. 51, P. 113002 (10 pp)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

-
- [1] Itoh K. et al. Roles of Electric Field on Toroidal Magnetic Confinement // IEEE Trans. Plasma Sci.– 1994.– V. 22.– P. 376.
- [2] Burrell K.H. et al. Physics of the L-mode to H-mode transition in tokamaks // Plasma Phys. Control. Fusion.– 1992. – V. 34. – P. 1859.
- [3] Rozhanskij V., Tendler M. Plasma rotation in tokamaks. in: Rev. Plasma Phys.– ed. B.B. Kadomtsev.– Cons. Bureau, NY-London.– 1996.– V.– 19.– P.– 147-249.

-
- [4] Fujisawa A. Experimental Study of the Bifurcation Nature of the electrostatic potential of a toroidal helical plasma // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2002. – V. 44. – P. A1.
- [5] Fujisawa A. A review of zonal flow experiments // 2009 Nucl. Fusion 49 013001
- [6] Jobes F.C. and Hickok R.L. A direct measurement of plasma space potential // Nucl. Fusion. – 1970. – V. 10. – P. 195-197.