

На правах рукописи

ЛИЗУНОВ Андрей Александрович

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПРОФИЛИ
ДАВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАЗМЫ
В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ИВАНОВ Александр Александрович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

АФАНАСЬЕВ Валерий Иванович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, старший научный сотрудник.

ИВАНОВ Иван Анатольевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, старший научный сотрудник

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», г. Троицк.

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2013 г. в « _____ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Линейная система для магнитного удержания плазмы газодинамическая ловушка (ГДЛ) [1] имеет определённые перспективы в рамках программы развития термоядерной энергетики [2] и материаловедческих исследований. Наиболее развитым на сегодняшний день является проект источника нейтронов с энергией 14 МэВ [3] на основе ГДЛ с двухкомпонентной анизотропной плазмой [4, 5]. Для решения этой задачи, как и для достижения прогресса по другим прикладным направлениям развития концепции ГДЛ, необходимо проведение комплексного экспериментального и теоретического исследования удержания и нагрева плазмы в аксиально-симметричном магнитном поле с большим пробочным отношением. Целью исследований, направленных на проектирование и строительство прикладных установок следующих поколений, является создание физической базы данных, способной исчерпывающим образом описать процессы и явления, происходящие в плазме, сформировать достоверные прогнозы и скейлинги для систем «следующего шага».

Подход к реализации управляемой термоядерной реакции в плазме с магнитным удержанием, реализуемый в газодинамической ловушке, заключается в создании двухкомпонентной плазмы. В данной схеме, «термоядерная» компонента образуется наклонной инжекцией мощных атомарных пучков [6] (в источнике нейтронов на основе ГДЛ предполагается использование пучков трития и дейтерия). При энергии $10 \div 15$ кэВ, захваченные быстрые ионы имеют анизотропную функцию распределения в пространстве скоростей. Как следствие, реализуется анизотропное распределение плотности быстрых ионов в объёме центральной секции ловушки, в которую производится инжекция пучков. Область, занятая быстрыми ионами, ограничена с двух сторон зонами, в которых происходит отражение частиц в сильном магнитном поле. Именно эти зоны – окрестности точки остановки – концентрируют основную долю удерживаемых быстрых ионов. Продольные распределения плотности и давления плазмы имеют максимумы в области точек остановки, которые таким образом, являются зонами увеличенной интенсивности термоядерных реакций и потока нейтронов. Энергетическое, угловое и пространственное распределения быстрых ионов в области точки остановки определяются процессами столкновений, взаимодействия с магнитным и электрическим полями, процессами переноса. С прикладной точки зрения, пространственное распределение давления и параметра $\beta = 8\pi p/B^2$ в значительной степени характеризует «эффективность» системы как равновесия плазма-магнитное поле с плотными сгустками анизотропной компонен-

ты в областях точек остановки, генерирующими нейтроны. Понятно, что задача исследования пространственных распределений давления плазмы в этих зонах является чрезвычайно важной для газодинамической ловушки.

Прогресс последних десятилетий в развитии методов диагностики высокотемпературной плазмы и создании новых инструментов и технологий вывел концепцию использования динамического эффекта Штарка на лидирующую позицию среди конкурирующих подходов к бесконтактному измерению магнитного поля в плазме [7]. Диагностики на основе динамического эффекта Штарка (Motional Stark Effect, MSE) широко применяются в современных токамаках и стеллараторах для измерения магнитного поля в плазме, распределений плазменного тока и запаса устойчивости [8]. На других установках с магнитным удержанием плазмы, таких как открытые ловушки и пинчи с обращённым полем, MSE-диагностики также используются для измерений абсолютной величины и питч-угла магнитного поля, для вычисления β и других характеристик равновесия [9]. В условиях эксперимента на ГДЛ, такой подход имеет дополнительную методическую сложность, связанную с малой величиной измеряемого магнитного поля: $B \leq 0.7 T$. Кроме того, требуется малая относительная погрешность измерений $\epsilon_B \leq 0.05$. Последнее является критическим параметром для измерения диамагнитной модификации поля в плазме с конечным давлением. Высокий уровень требований способствует разработке оригинальных решений, введению инноваций в аппаратную и аналитическую компоненты диагностики. Разработка MSE-диагностики на ГДЛ для измерения малых магнитных полей чрезвычайно интересна как развитие современного метода диагностики и создание конкретной измерительной системы с уникальными параметрами [10, 11].

Цель диссертации

Целью данной работы является разработка диагностики для бесконтактного измерения локального магнитного поля в плазме и изучение пространственных профилей давления плазмы в газодинамической ловушке с её помощью.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им была проведена разработка спектральной MSE-диагностики для ГДЛ, разработка численной модели для интерпретации данных измерений, проведены измерения пространственных профилей давления плазмы.

Научная новизна

Созданная MSE-диагностика на установке ГДЛ имеет уникальную возможность измерения предельно малого магнитного поля вплоть до $0.3 T$ с точностью 2% и разрешением по времени 200 мкс. Результат измерения магнитного поля в плазме ГДЛ $B = 0.29 T$ является рекордным для MSE-диагностик на установках с магнитным удержанием.

Впервые на ГДЛ были проведены прямые измерения давления плазмы в области точки останова быстрых ионов. Показано, что параметр β превышает 0.4 в процессе инжекции мощных пучков дейтерия в ГДЛ. Обнаружен эффект «пинчевания» в ГДЛ – быстрого формирования компактного радиального профиля давления анизотропной плазмы.

Научное и практическое значение результатов

Разработка спектральной MSE-диагностики на ГДЛ является существенным вкладом в развитие современных прецизионных методов исследования плазмы с термоядерными параметрами. Наибольшее значение полученные результаты имеют для установок для удержания плазмы с относительно малым магнитным полем, таких как линейные системы и пинчи с обращённым полем.

Экспериментальное подтверждение возможности устойчивого удержания анизотропной плазмы с β , превышающим 0.4, является принципиально важным для развития проекта источника нейтронов на основе газодинамической ловушки и других приложений. Обнаружение эффекта «пинчевания» позволило приступить к исследованию нового класса явлений релаксации функции распределения быстрых ионов в ГДЛ в условиях высокого β .

Результаты исследований, описанных в диссертации, могут быть полезны при подготовке и проведении экспериментов на установке ГДЛ, а также на других установках с магнитным удержанием плазмы. Разработанные диагностические методики могут представлять интерес для применения в комплексах активной спектроскопической и корпускулярной диагностики термоядерных установок. Результаты работы могут быть использованы для развития исследовательских установок следующего поколения на основе газодинамической ловушки и при проектировании систем на базе ГДЛ для решения прикладных задач. Результаты работы могут быть непосредственно использованы в ИЯФ СО РАН и Государственном научном центре РФ Троицкий Институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ).

Результаты диссертации использовались в работе на установке MST в Университете Висконсин-Мэдисон (г. Мэдисон, США).

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработана спектральная MSE-диагностика для измерения магнитного поля в плазме.
2. Разработана численная модель оптических переходов мультиплета H_{α} , предназначенная для расчёта спектра излучения пучка и обработки данных измерений.
3. Проведены измерения магнитного поля в плазме в центральной плоскости ГДЛ. Продемонстрирован экспериментальный результат $|B| = 0.29 \pm 0.007 T$, который соответствует минимальной величине поля, измеренной при помощи MSE-диагностики на установках с магнитным удержанием плазмы.
4. Проведены измерения пространственного профиля магнитного поля в плазме ГДЛ в области точки останова быстрых ионов. На основании измерений, вычислено значение β , превышающее 0.4 при инжекции мощных пучков дейтерия в ГДЛ.
5. Обнаружен эффект пинчевания – быстрого радиального сжатия распределения давления быстрых ионов в ГДЛ.

Апробация результатов работы

Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах в ведущих отечественных и зарубежных центрах, таких как ИЯФ СО РАН в г. Новосибирск (Россия), Университет Висконсин-Мэдисон (США). Результаты работы докладывались на четырёх Звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2000, 2001, 2003, 2004), трёх конференциях Европейского физического общества по физике плазмы (EPS-2000, Будапешт, Венгрия, EPS-2003, Санкт-Петербург, EPS-2013, Эспоо, Финляндия), трёх Международных конференций по открытым системам для удержания плазмы (OS-2004, Новосибирск, OS-2010, Новосибирск, OS-2012, Цукуба, Япония), трёх Российских конференциях по диагностике высокотемпературной плазмы (Троицк, 2003, Звенигород, 2005, Звенигород, 2013), Конференции по инновационным концепциям удержания плазмы (2006, Остин, США), Конференции по диагностике высокотемпературной плазмы (HTPD-2004, Сан-Диего, США).

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации **115** страниц текста с **34** рисунками и **6** таблицами. Список литературы содержит **80** наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы основные цели работы, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложено содержание каждой главы, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию линейной магнитной ловушки ГДЛ, задач и параметров эксперимента.

В разделе 1.1 описаны принципы удержания плазмы в газодинамической ловушке. Вводятся базовые параметры, описывающие время жизни и продольные потери в ГДЛ. Кратко рассмотрены основные физические и инженерные задачи реализации проекта источника нейтронов на основе ГДЛ, связь исследовательской программы ГДЛ с упомянутым проектом и другими прикладными направлениями.

В разделе 1.2 описаны основные элементы и подсистемы экспериментальной установки ГДЛ. Магнитная система ГДЛ реализована в виде аксиально-симметричного пробкотрона длиной 7 м. Магнитное поле в центральной плоскости может варьироваться в пределах $0.2 \div 0.33 T$, поле в пробках может достигать $15 T$, что позволяет изменять пробочное отношение в широких пределах. Для создания стартовой «мишенной» плазмы и поддержания баланса частиц во время эксперимента используется газоразрядный источник и системы инжекции молекулярного дейтерия или водорода (газбоксы). Нагрев плазмы и формирование популяции быстрых ионов осуществляется при помощи инжекции мощных атомарных пучков. В описанных экспериментах в различных режимах использовались две версии системы атомарной инжекции ГДЛ: шесть пучков с энергией 15 кэВ и суммарной мощностью 4 МВт и восемь пучков с энергией 25 кэВ и суммарной мощностью 6 МВт. Основные параметры ГДЛ приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметр	Значение
Расстояние между пробками	7 м
Магнитное поле в центральной плоскости в пробках	до $0.33 T$ $2.5 \div 15 T$
Плотность мишенной плазмы	$\approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$
электронная температура	до 250 эВ
радиус в центральной плоскости	$\approx 10 \text{ см}$
Плотность быстрых ионов в точках остановки	$\approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Средняя энергия быстрых ионов	$\approx 10 \text{ кэВ}$
Максимальное локальное β	0.4

Вторая глава посвящена описанию спектральной MSE-диагностики для измерения магнитного поля в плазме ГДЛ.

В разделе 2.1 рассмотрены основные варианты реализации метода измерения магнитного поля на основе динамического эффекта Штарка в современных диагностиках на установках с магнитным удержанием. Приведен краткий сравнительный анализ сильных и слабых сторон различных версий диагностики на основе динамического эффекта Штарка, указаны границы их применимости.

В разделе 2.2 сформулированы требования к MSE-диагностике для измерения магнитного поля в плазме ГДЛ.

В разделе 2.3 изложены физические основы метода измерения магнитного поля на основе MSE, приведены базовые определения и уравнения. Схематично рассмотрена структура спектра штарковского мультиплета H_α и зависимость величины расщепления уровней энергии от внешнего магнитного поля. В рамках простой модели, расщепление линий пропорционально магнитному полю для атома водорода, что определяет использование водородных и дейтериевых пучков для таких диагностик.

В разделе 2.4 описана спектральная MSE-диагностика на ГДЛ. Диагностика состоит из трёх основных компонент:

- диагностический атомарный пучок;
- оптическая система регистрации излучения;
- модель для обработки данных измерений.

Далее приведена характеристика атомарного пучка, обладающего требуемыми параметрами. Среди диагностик для активной пучковой и спектроскопической диагностики плазмы, MSE-диагностика предъявляет наиболее жёсткие (и отчасти противоречивые) требования к пучку. Выбор параметров и соответствующей конструкции ионного источника – вопрос баланса требований, который должен быть разрешен в рамках конкретной диагностической системы. Атомарный пучок DINA-5M, применявшийся для MSE-диагностики на ГДЛ, позволил реализовать основную цель: добиться приемлемого углового разброса при использовании ионно-оптической системы с геометрической фокусировкой и большой плотностью тока в фокусе.

Основой оптической системы регистрации служит спектрометр на основе дифракционной решётки и цифровой ПЗС-детектор с высокой квантовой эффективностью и малым уровнем собственных шумов. Монохроматор сконструирован по оптической схеме Эберта-Фасти, он имеет малую светосилу (относительное отверстие 1:12) и соответственно пренебрежимые aberrации изображения. Последнее является критически важным в приборах с регистрирующим элементом на основе двумерной мат-

Таблица 2.

Фокусное расстояние	500 мм
Дифр. решетка	1800 штр./мм
Ширина вх. щели	25 ÷ 50 мкм
Относительное отверстие	≈ 1 : 12
Обратная линейная дисперсия	0.9 нм/мм
Спектральное разрешение	≈ 0.011 нм
Полуширина (по 1/e) аппаратного контура	≈ 0.02 нм
Увеличение	≈ 1

рицы, как в случае MSE-диагностики на ГДЛ. При разработке диагностики, удалось оптимизировать оптическую систему таким образом, что рабочее соотношение сигнал/шум оказывается достаточным даже при использовании данного спектрального прибора с малой светосилой. Основные характеристики монохроматора приведены в таблице 2.

Оптическая система диагностики имеет одну линию наблюдения, направление которой может изменяться при помощи специального юстировочного узла. Это позволяет осуществлять сканирование в плоскости, перпендикулярной магнитной оси ГДЛ, а также вдоль оси. При настройке линии наблюдения на ось, угол по отношению к диагностическому пучку составляет $\Theta_0 = 22.5^\circ$.

Существенной частью «аналитической» компоненты диагностики являются процедуры калибровки спектральной дисперсии и спектральной ширины линии излучения атомарного пучка. Первоначальная калибровка дисперсии выполняется на стенде по известным линиям излучения дейтериевой (с примесью водорода) и ртутной ламп. В экспериментальных условиях проводится оперативная калибровка по линиям H_α (656.285 нм) и CII (658.288 нм). Оперативная калибровка использовалась при повороте дифракционной решётки спектрометра. Калибровка спектральной ширины линии излучения пучка необходима для увеличения надежности и точности обработки измеренного спектра методом аппроксимации модельной функцией. Калибровка производится измерением спектра при инъекции пучка в газовую мишень в нулевом магнитном поле. Измеренная таким образом ширина линии излучения соответствует эффективному спектральному разрешению диагностики, она используется в качестве фиксированного параметра аппроксимации рабочих спектров при помощи модели. Согласно измерениям, эффективное спектральное разрешение равно $\delta\lambda_{sum} \simeq 0.055$ нм.

Далее в разделе 2.4 (подразделы 2.4.4 и 2.4.5) описаны измерения магнитного поля в плазме ГДЛ при помощи разработанной MSE-диагностики. Измерения проводились при различных сценариях эксперимента ГДЛ с точки остановки быстрых ионов, а также в центральной плоскости

установки. Эти зоны соответствуют максимуму и минимуму давления быстрых ионов, соответственно. Результат измерения магнитного поля в центре при значении вакуумного магнитного поля $B_{vac} = 0.315 T$: $|\mathbf{B}| = 0.29 \pm 0.007 T$ с временем интегрирования 180 мкс. Это наименьшая величина магнитного поля, которую удалось измерить при помощи MSE-диагностики в установках для удержания плазмы. Характерный результат измерения магнитного поля в точке остановки быстрых ионов в том же режиме: $B = 0.428 \pm 0.013 T$. Индукция вакуумного поля в точке остановки составляет $B_{vac}^{(2)} = 7.3 T$ (пробочное отношение в данном сечении равно $R = 2$).

Третья глава посвящена описанию численной модели распределения интенсивности в штарковском мультиплете H_α .

В разделе 3.1 изложена постановка задачи: переход от простой аналитической формулы штарковского расщепления линии к численному решению квантово-механической задачи с учётом всех существенных взаимодействий, приводящих к модификации уровней энергии электрона в атоме водорода. Следует заметить, что целью данной части работы является разработка численной модели, удобной для практического применения при обработке данных измерений спектральной MSE-диагностики. Модель базируется на подробно изученных эффектах и содержит хорошо известные формулы и уравнения.

В разделе 3.2 описан метод вычислений. Оператор взаимодействия записан следующим образом:

$$\hat{H}_{total} = \hat{H}_{Stark} + \hat{H}_{Zeeman} + \hat{H}_{rel},$$

где \hat{H}_{Stark} – гамильтониан взаимодействия с электрическим полем (эффект Штарка), \hat{H}_{Zeeman} – гамильтониан взаимодействия с магнитным полем (эффект Зеемана), \hat{H}_{rel} – гамильтониан, описывающий спин-орбитальное взаимодействие, лэмбовский сдвиг и релятивистскую зависимость энергии уровней от квантовых чисел. Значения уровней энергии являются собственными числами матрицы полного оператора взаимодействия. В свою очередь, относительные интенсивности переходов между подуровнями пропорциональны матричным элементам координаты \mathbf{r} , вычисленным по состояниям – собственным векторам оператора взаимодействия.

В разделе 3.3 подробно рассмотрены все слагаемые оператора взаимодействия, записаны основные уравнения для собственных чисел и собственных векторов.

В разделе 3.3 приведены результаты вычислений. В модели используется реальная геометрия, соответствующая MSE-диагностике на ГДЛ. При этом производится моделирование компонент спектра с поляризацией, соответствующей измеряемому оптическому сигналу. Также модель

учитывает конечное спектральное уширение каждой линии излучения, которое может задаваться в соответствии с результатами калибровки диагностики. В данном разделе показаны примеры модельных спектров для различных значений магнитного поля и энергии частиц пучка. Показано, что в магнитном поле $B \leq 0.3 T$ и энергии инжекции водородного пучка $E_{inj} \leq 40$ кэВ влияние эффектов тонкой структуры достаточно велико. Поэтому использование точной квантово-механической модели для обработки экспериментальных данных в таких условиях является необходимым.

Разделы 3.5 и 3.6 – приложения, содержащие список констант задачи и полные матрицы оператора взаимодействия.

Четвертая глава посвящена результатам измерения радиального профиля β двухкомпонентной плазмы в ГДЛ.

В разделе 4.1 подробно описан сценарий эксперимента. Стартовая «мишенная» плазма создавалась при помощи источника, расположенного в торцевом баке ГДЛ. В «мишенную» плазму производилась инжекция шести дейтериевых пучков СТАРТ-3, параметры пучков приведены в Главе 1. В конце импульса инжекции длительностью 1 мс энергия популяции быстрых ионов достигала 0.9 кДж, электронная плотность – $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, электронная температура – 200 эВ.

В разделе 4.2 проделаны численные оценки поперечного β компоненты быстрых ионов в области точки остановки, соответствующие экспериментальным параметрам. В предположении малой ширины угловой функции распределения, оценка даёт $\beta_{\perp}^{turn} \sim 0.3$. Как показывают результаты измерений при помощи MSE-диагностики, эта оценка находится в удовлетворительном согласии с экспериментом.

В разделе 4.4 приведены результаты измерения радиального профиля давления плазмы в области точки остановки быстрых ионов в ГДЛ. Приведены осциллограммы основных параметров: захваченной мощности атомарной инжекции и диамагнетизма (энергии плазмы). Показаны радиальные профили электронной температуры и плотности плазмы, измеренные при помощи диагностики томсоновского рассеяния в центральной плоскости ГДЛ. Согласно данным MSE-диагностики, в описанном выше режиме эксперимента магнитное поле в точке остановки имеет величину $B = 0.428 \pm 0.013 T$. Диамагнитное ослабление поля в плазме характеризуется величиной $\Delta B/B = \frac{B_{vac} - B_{pl}}{B_{vac}}$. В рамках приближения равновесия плазмы с резкой границей в магнитном поле, можно вычислить $\beta_{\perp} \simeq 2 \frac{\Delta B}{B}$. Тогда максимальное значение β_{\perp} на оси, измеренное на конечной стадии инжекции мощных дейтериевых пучков, равно 0.4. Эта величина близка к теоретическому пределу устойчивости относительно баллонных мод МГД-колебаний в ГДЛ. Кроме того, характерный раз-

мер радиального профиля давления равен $\simeq 8$ см, что приблизительно соответствует ларморовскому радиусу иона с энергией $\simeq 10$ кэВ – средней энергией популяции быстрых ионов. Сформулирован вывод о экспериментальном наблюдении формирования компактного сгустка анизотропной плазмы с высоким давлением в области точки остановки. Этот эффект условно назван «пинчеванием» быстрых ионов в ГДЛ.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе:

1. Разработана спектральная диагностика для измерения магнитного поля в плазме на основе динамического эффекта Штарка. Основной задачей MSE-диагностики является определение модификации магнитного поля в плазме, связанной с давлением анизотропной компоненты, и вычисление параметра β . Точность измерения локального магнитного поля составляет $2 \div 4\%$, что позволяет вычислять β плазмы с погрешностью порядка 10% в стандартном режиме ГДЛ. Пространственное разрешение диагностики позволяет измерять радиальное распределение давления плазмы.
2. Разработана модель структуры уровней энергии и относительной интенсивности оптических переходов мультиплета H_α . Численный код на основе данной модели позволяет моделирование спектра излучения водородного или дейтериевого пучка, движущегося в поперечном магнитном поле произвольной напряжённости. Модель предназначена для математической обработки результатов измерений MSE-диагностики на ГДЛ.
3. Достигнута точность измерения $0.007 T$ в области предельно малых магнитных полей вплоть до $0.29 T$. Это минимальная величина магнитного поля, измеренная при помощи MSE-диагностики в установках для удержания плазмы.
4. При помощи MSE-диагностики на ГДЛ были проведены локальные измерения β анизотропной плазмы высокого давления в области точки остановки быстрых ионов. Максимальное значение β на оси составляет 0.4 , что близко к предсказываемому теорией пределу устойчивости для баллонных мод МГД-колебаний. Максимальная плотность быстрых ионов $\simeq 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, оказывается близкой к плотности мишенной плазмы, равной $\simeq 2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.
5. Характерный поперечный размер профиля β , равный $\simeq 8$ см, близок к величине ларморовского радиуса иона со средней энергией 10 кэВ ($\simeq 5.6$ см).
6. Результаты измерений позволяют сделать заключение о существовании эффекта «пинчевания» – формирования компактного ради-

ального профиля давления анизотропной плазмы в ГДЛ. Ионно-горячая анизотропная плазма с высоким β удерживается в МГД-устойчивом режиме.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A.A. Ivanov, A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, P.P. Deichuli, S.A. Korepanov, A.A. Lizunov, et. al. Experimental evidence of high-beta plasma confinement in an axially symmetric gas dynamic trap. // *Physical Review Letters* 04/2003, 90(10):105002.
2. Andrej Lizunov, Alexander Donin, Valeriy Savkin. Spectral motional Stark effect diagnostic for measurement of magnetic fields below 0.3 T. // *Review of Scientific Instruments* 08/2013, 84(8):086104.
3. A.A. Lizunov, D.J. Den Hartog, et. al. Multi-point measurement of $|B|$ in the gas-dynamic trap with a spectral motional Stark effect diagnostic. // *Review of scientific instruments* 08/2011, 82(8):086105.
4. G.F. Abdrachitov, P.A. Bagryansky, D.J. Den Hartog, A.A. Ivanov, S.A. Korepanov, A.A. Lizunov, G. Fiskel, D.A. Khilchenko. Motional Stark Effect Diagnostic for Multi-Chord Measurements of Plasma Beta in GDT. // *Fusion Science and Technology* 01/2005, 47(1T).
5. D.J. Den Hartog, D. Craig, D.A. Ennis, G. Fiskel, S. Gangadhara, D.J. Holly, J.C. Reardon, V.I. Davydenko, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, M.G. O'Mullane, and H.P. Summers. Advances in neutral-beam-based diagnostics on the Madison Symmetric Torus reversed-field pinch. // *Review of Scientific Instruments* 10/2006; 77(10):10F122.
6. D.J. Den Hartog, J.-W. Ahn, A.F. Almagri, J.K. Anderson, A.A. Lizunov, et. al. Recent improvements in confinement and beta in the MST reversed-field pinch. // *Nuclear Fusion* 08/2007; 47(9):L17.
7. P.A. Bagryansky, P.P. Deichuli, A.A. Ivanov, S.A. Korepanov, A.A. Lizunov, S.V. Murakhtin, V.Ya. Savkin, D.J. Den Hartog, G. Fiskel. Measurements of the radial profile of magnetic field in the Gas-Dynamic Trap using a motional Stark effect diagnostic. // *Review of Scientific Instruments* 02/2003; 74(3):1592-1595.
8. T.C. Simonen, A. Anikeev, P. Bagryansky, A. Beklemishev, A. Ivanov, A. Lizunov, V. Maximov, V. Prikhodko, Yu. Tsidulko. High Beta Experiments in the GDT Axisymmetric Magnetic Mirror. // *Journal of Fusion Energy* 04/2012; 29(6):558-560.
9. A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, S.V. Murakhtin, V.V. Prikhodko, A.L. Solomakhin, K. Noack. Confinement of Strongly Anisotropic Hot-ion Plasma in a Compact Mirror. // *Journal of Fusion Energy* 01/2007; 26(1):103-107.
10. A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, V.V. Prikhodko. Study of Fast Ion Profiles in the Gas Dynamic Trap. // *Fusion Science and Technology - FUSION SCI TECHNOL.* 01/2005; 47:92-95.

11. V.V. Maximov, A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, S.V. Murakhtin, K. Noack, V.V. Prikhodko. Spatial profiles of fusion product flux in the gas dynamic trap with deuterium neutral beam injection. // Nuclear Fusion 03/2004; 44(4):542.

Список литературы

- [1] Ivanov A.A., Prikhodko V.V. Gas-dynamic trap: an overview of the concept and experimental results. // Plasma Physics and Controlled Fusion. - 2013. - Vol. 55. - P. 063001.
- [2] Мирнов В.В., Рютов Д.Д. Газодинамическая ловушка. // В сб. Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез. М.: ЦНИИАТОМ-ИНФОРМ - 1980. - Вып. 1, No. 57. - С. 57-66.
- [3] Котельников И.А., Рютов Д.Д., Цицулко Ю.А., Катышев В.В., Комин А.В., Кривошеев В.М. Математическая модель источника нейтронов на основе газодинамической ловушки. // Препринт/Ин-т ядер. физики СО АН СССР - 1990. - С. 90-105.
- [4] Maximov V.V., Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Ivanov A.A., Lizunov A.A., Murakhtin S.V., Noack K., Prikhodko V.V. Spatial profiles of fusion product flux in the gas dynamic trap with deuterium neutral beam injection. // Nuclear Fusion. - 2004. - Vol. 44, No. 4. - P. 542-547.
- [5] A.A. Ivanov, A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, D.J. Den Hartog, G. Fiksel, P.P. Deichuli, S.A. Korepanov, K. Noack, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin and V.Ya. Savkin. Experimental Evidence of High-Beta Plasma Confinement in an Axially Symmetric Gas Dynamic Trap. // Phys. Rev. Letters. - 2003 - Vol. 90. - No. 10. - P. 105002.
- [6] Abdrashitov G.F., Abdrashitov A.G., Deichuli P.P., Donin A.S., Khilchenko A.D., Lizunov A.A., Moiseev D.V., Murakhtin S.V., Sorokin A.V., Zubarev P.V. Neutral beam system of the gas dynamic trap. // Transactions of Fusion Science and Technology. - 2011. - Vol. 59. - P. 280.
- [7] Levinton F.M. The motional Stark effect: Overview and future development. // Rev. Sci. Instrum. - 1999. - Vol. 70. - No. 1. - P. 810-814.
- [8] Wroblewski D., Lao L.L. Polarimetry of motional Stark effect and determination of current profiles in DIII-D. // Rev. Sci. Instrum. - 1992. - Vol. 63. - No. 10. - P. 5140-5147.
- [9] Den Hartog D., Craig D., Ennis D., Fiksel G., Gangadhara S., Holly D., Reardon J., Davydenko V., Ivanov A., Lizunov A. Advances in neutral-beam-based diagnostics on the Madison Symmetric Torus reversed-field pinch. // Rev. Sci. Instr. - 2006. - Vol. 77. - P. 10F122.
- [10] Lizunov A.A., Den Hartog D.J., Donin A.S., Ivanov A.A., Prikhodko V.V. Multi-point measurement of B in the gas-dynamic trap with a spectral motional Stark effect diagnostic. // Rev. Sci. Instr. - 2011. - Vol. 82. - P. 086105.
- [11] Lizunov A.A., Donin, A.S., Savkin V.Ya. Spectral motional Stark effect diagnostic for measurement of magnetic fields below 0.3 T. // Rev. Sci. Instr. - 2013. - Vol. 84. - P. 086104.

ЛИЗУНОВ Андрей Александрович

**Пространственные профили
давления анизотропной плазмы
в газодинамической ловушке**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 19.11.2013 г.

Сдано в набор 19.11. 2013 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 30

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринте ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11