

На правах рукописи

ПРИХОДЬКО Вадим Вадимович

УДЕРЖАНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ
ГОРЯЧИХ ИОНОВ В УСТАНОВКЕ ГДЛ

01.04.08 - физика плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Багрянский — доктор физико-математических наук,
Пётр Андреевич Учреждение Российской академии наук,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Бурдаков — доктор физико-математических наук,
Александр Владимирович Учреждение Российской академии наук,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

Дудникова — доктор физико-математических наук,
Галина Ильинична Учреждение Российской академии наук,
Институт вычислительных технологий
СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ — Институт ядерного синтеза
ОРГАНИЗАЦИЯ: РИЦ “Курчатовский институт”,
г. Москва.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2009 г.
в “_____” часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.03
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Рос-
сийской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО
РАН.

Автореферат разослан “_____” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук,

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Газодинамическая ловушка (ГДЛ) представляет собой осесимметричный пробкотрон с большим пробочным отношением и длиной, превосходящей среднюю длину пробега ионов относительно рассеяния в конус потерь. В этих условиях удерживаемая в ГДЛ плазма является столкновительной, а время продольного удержания определяется простой газодинамической оценкой (соответствующей времени истечения газа из сосуда с маленьким отверстием). Такая схема удержания была впервые предложена в ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН в конце семидесятых годов В.В.Мирновым и Д.Д.Рютовым [1].

Очень важным возможным применением газодинамической ловушки является создание на ее основе относительно дешевого и компактного источника нейтронов D-T реакции с энергией 14 МэВ [2]. Необходимость такого источника для ускоренного испытания материалов и узлов будущего термоядерного реактора в настоящее время общепризнанна [3]. В источнике нейтронный поток возникает в результате столкновений быстрых ионов дейтерия и трития, образованных наклонной инжекцией атомов в относительно холодную и столкновительную водородную мишенную плазму. Следует подчеркнуть, что проект источника нейтронов на основе газодинамической ловушки допускает только кулоновский механизм рассеяния быстрых ионов. Наличие небольших аномалий в скорости рассеяния, не вызывающих существенного уменьшения времени удержания за счет ухода частиц в конус потерь, приводит к уширению угловой функции распределения быстрых ионов, что неминуемо влечет за собой уменьшение пикировки¹ продольного распределения потока нейтронов, и тем самым снижает эффективность нейтронного генератора. Изучение удержания и процессов формирования пространственных распределений плотности быстрых ионов является основной задачей диссертационной работы. Результаты исследований быстрых ионов в центральной части ГДЛ составляют первую часть диссертации.

Основным каналом потерь, определяющим баланс частиц в источнике нейтронов на основе ГДЛ, является газодинамическое течение плазмы через пробки. Существенное влияние на скорость потерь могут оказывать пики амбиполярного потенциала, возникающие в области пиков плотности быстрых ионов. Для изучения этой возможности применительно к ГДЛ, был реализован предложенный в [5] эксперимент с дополнительным

¹ Отношение потока нейтронов в области точек остановки быстрых ионов к потоку в центральной плоскости установки.

компактным пробкотроном, присоединенным к одной из пробок установки. Вторая часть диссертации посвящена изучению параметров плазмы в компактном пробкотроне. Отдельное внимание уделено вопросу устойчивости плазмы относительно высокочастотных колебаний, вызываемых анизотропией функции распределения ионов в фазовом пространстве. Проведено сравнение результатов измерений с результатами численного моделирования, основанного на кулоновской кинетике обмена энергией между электронной и ионной компонентами плазмы [6, 7].

В третьей главе исследуется вопрос об амбиполярном подавлении продольных потерь из центральной ячейки с помощью компактного пробкотрона. Накопление быстрых ионов в компактном пробкотроне приводит к появлению пика электростатического потенциала, препятствующего вытеканию тёплой плазмы из ловушки. Представлены экспериментальные данные и теоретические оценки, выполненные для разной степени столкновительности тёплой плазмы. Основное внимание уделено выяснению причин существенного подавления потерь при сравнительно невысокой величине амбиполярного потенциала.

Важным условием для проведения исследований было наличие диагностики, удобной для изучения пространственных распределений плотности горячих ионов в ГДЛ. Измерения параметров плазмы проводились в разных режимах, поэтому диагностика должна собирать достаточный для анализа объём данных за наименьшее количество импульсов установки. С этой целью был создан анализатор атомов перезарядки. В первой части диссертации приведено описание этого прибора и сделан краткий обзор подобных устройств.

Цель работы

- Создание адекватных диагностик.
- Детальное исследование радиальных распределений быстрых ионов и продуктов термоядерных реакций в центральной ячейке ГДЛ.
- Исследование удержания быстрых ионов в компактном пробкотроне на ГДЛ.
- Объяснение зависимости подавления продольных потерь из центральной ячейки ГДЛ от плотности быстрых ионов в компактном пробкотроне.

Научная новизна. В экспериментах с $\beta = 40\%$ близким к порогу развития болонной неустойчивости в центральной ячейке ГДЛ обнару-

жен эффект “сжатия” быстрых ионов к оси установки. Этот эффект может сильно повлиять на интенсивность термоядерных реакций в проекте источника нейтронов на основе ГДЛ. Предложено качественное объяснение эффекта на основе работы [8].

В аксиально-симметричном амбиполярном пробочном узле при умеренной мощности атомарной инжекции накоплена плотная плазма с высокой степенью анизотропии в фазовом пространстве. Сфокусированные атомарные пучки с суммарной мощностью 0.8 МВт инжектировались перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. В результате процессов захвата образовывалась популяция быстрых ионов со средней энергией ~ 10 кэВ. Быстрые ионы занимали область длиной около 5 см и диаметром около 15 см. Плотность мишенной плазмы с температурой около 100 эВ была на порядок меньше плотности быстрых ионов. Максимальная плотность плазмы достигла $3.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при анизотропии функции распределения в пространстве скоростей $A = \langle E_{\perp} \rangle / \langle E_{\parallel} \rangle \approx 30$.

Впервые в газодинамической ловушке продемонстрировано уменьшение продольных потерь за счёт создания амбиполярного потенциала в дополнительном аксиально-симметричном концевом пробкотроне. Существенное подавление потока ионов (в 5 раз) наблюдалось при амбиполярном потенциале ниже температуры $e\phi/T < 1$. Это объясняется переходом от случая заполненного конуса потерь при низком амбиполярном потенциале $e\phi/T \leq 0$ к случаю пустого конуса потерь при $e\phi/T \sim 1$. Такой переход возможен когда характерная длина пробега теплового иона сравнима с длиной ловушки.

При превышении порогового значения плотности быстрых ионов зафиксировано появление колебаний потенциала плазмы на частотах вблизи ионно-циклотронной частоты. Этот эффект может быть объяснён развитием микронеустойчивости, связанной с анизотропией распределения ионов в фазовом пространстве. Увеличения потерь быстрых ионов, связанных с развитием микронеустойчивости, не обнаружено.

Вклад автора. Личное участие автора в получении результатов, представленных в диссертации, является определяющим. Им разработан анализатор атомов перезарядки, создан и модифицирован ряд других диагностик, проведены оценки и численные расчёты параметров эксперимента.

Практическое значение результатов. С точки зрения теории, эффект формирования узкого радиального профиля плотности быстрых ионов интересен как один из эффектов самоорганизации плазмы с высоким β . Практическая ценность для установки ГДЛ и проекта нейтронного источника на основе ГДЛ состоит в том, что этот эффект приводит к

увеличению β плазмы, плотности быстрых ионов и к росту количества термоядерных реакций, происходящих в плазме в единицу времени.

Ценность экспериментов с компактным пробкотроном состоит в моделировании аксиально-симметричного амбиполярного пробочного узла. Полученные результаты также могут быть использованы для проверки критериев микроустойчивости плазмы с высокой анизотропией в пространстве скоростей.

Апробация диссертации. Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах в ведущих отечественных и зарубежных центрах, таких как ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), Институт проблем безопасности Исследовательского центра Россендорф (Германия). Кроме того, результаты работы докладывались на Всероссийской конференции по физике плазмы и УТС (2004-2009, Звенигород), Международной конференции “Open Magnatic System for Plasma Confinement” (2004 – Новосибирск и 2006 – Цукуба, Япония), Международной конференции “EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics” (2003 – Санкт-Петербург, 2005 – Таррагона, Испания, 2007 – Варшава, Польша), Конференции “Лаврентьевские чтения” (2003 – Новосибирск), 12 Международный конгресс по физике плазмы (2004 – Ницца, Франция).

Объём и структура работы. Диссертация состоит из Введения, трёх глав и Заключения. Текст диссертации содержит 160 страниц, 46 рисунков и 3 таблицы. Список литературы состоит из 76 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении представлено краткое описание физических принципов удержания плазмы в установке ГДЛ и проектируемом источнике нейтронов на основе газодинамической ловушки. Обсуждены цели диссертационной работы и дана оценка их актуальности.

Первая глава посвящена исследованию радиальных профилей плотности быстрых ионов с максимально достижимым параметром β в ГДЛ (β до 40%).

Анализатор атомов перезарядки был задуман как диагностика, призванная измерять потоки атомов перезарядки определённой энергии из разных областей плазмы. Такое устройство должно одновременно разделять анализируемые частицы как по энергии, так и по координате рождения в плазме. Для разделения частиц по энергии поток атомов вначале проходил через перезарядную мишень, где преобразовывался в поток ионов. Получившиеся ионы разделялись по энергии в 45-градусном

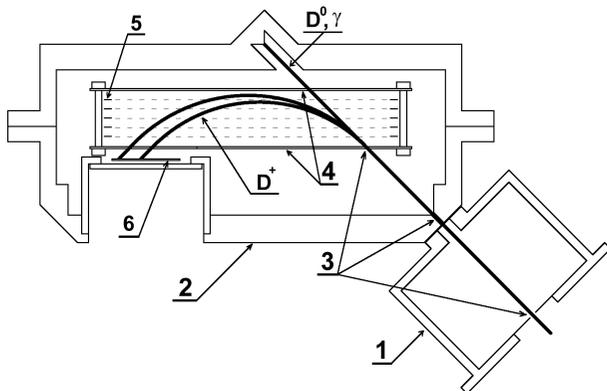


Рис. 1. Анализатор атомов перезарядки. 1 – перезарядная камера; 2 – камера анализатора; 3 – коллимационные отверстия; 4 – обкладки электростатического конденсатора; 5 – электроды для выравнивания потенциала (расположены по периметру обкладок); 6 – микроканальная пластина (приёмник регистрируемых частиц); жирными линиями изображены траектории частиц.

электростатическом анализаторе. Разделение по координате рождения атомов перезарядки в плазме, а точнее по углу влёта в анализатор, осуществлялось по тому же принципу, что и в камере-обскура. Схема анализатора представлена на рисунке 1.

Анализатор атомов перезарядки использовался в качестве основной диагностики для изучения радиальных распределений быстрых ионов. Следует отметить, что измерения проводились методом искусственной мишени. Локальность мишени и высокая прозрачность плазмы для получаемых атомов перезарядки позволяли существенно упростить интерпретацию результатов. Измеренные профили потока атомов перезарядки представлены на рис. 2. В тех же экспериментах был измерен профиль продуктов DD-реакций, который так же зависит от радиального распределения быстрых ионов (рис. 3).

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что профиль плотности быстрых ионов с энергиями на 20-50% ниже энергии атомов нагревных пучков оказывается вдвое уже начального профиля. Показано, что такое “сжатие” быстрых ионов к оси установки не является результатом их потерь на периферии плазмы. Также, этот эффект не может быть объяснён дрейфом за счёт парных кулоновских столкновений с частицами мишени плазмы в аксиально-симметричных магнитных

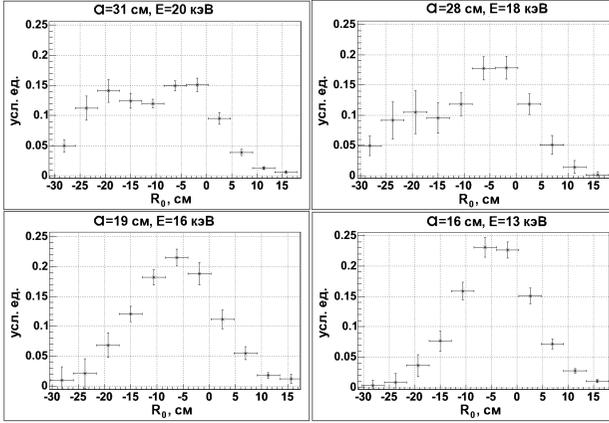


Рис. 2. Профили потока атомов перазарядки.

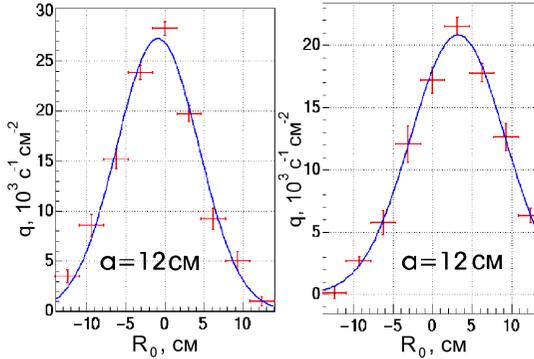


Рис. 3. Поперечные профили потока продуктов DD-реакции: сканирование в горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) плоскостях

полях. Предложено качественное объяснение эффекта на основе работы [8].

Во второй главе описываются эксперименты с компактным пробкотроном (КП) на ГДЛ. В компактном пробкотроне за счёт инъекции атомарных пучков перпендикулярно оси установки, создавалась популяция быстрых ионов с высокой степенью анизотропии в пространстве скоростей. Описан набор диагностик для измерения параметров плазмы. И приведены теоретические оценки этих параметров.

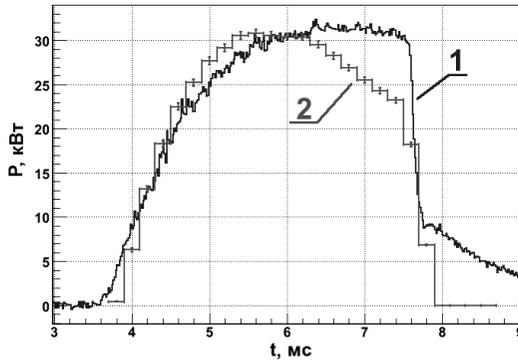


Рис. 4. Мощность перезарядных потерь: 1 – эксперимент, 2 – расчёт кодом ITCS.

В экспериментах измерялись такие параметры, как поток энергии на первую стенку (рисунок 4), профили потока атомов перезарядки и линейная плотность электронов. По ним восстанавливался пространственный профиль плотности быстрых ионов. На рисунке 5 приведена зависимость максимальной плотности быстрых ионов от мощности, захваченной плазмой из инжектированных атомарных пучков. Экспериментальные значения хорошо совпали с результатами расчётов с помощью кода ITCS [6, 7]. Это позволяет утверждать, что удержание быстрых ионов в компактном пробкотроне определяется кинетикой парных кулоновских столкновений с частицами мишенной плазмы и процессами перезарядки на нейтральной компоненте. В режиме с максимальной мощностью инжекции были достигнуты следующие параметры: плотность быстрых ионов $n_f = 3.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; плотность “тёплых” ионов $n_w = 0.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; доля мощности, захватываемой плазмой из нагревных пучков $k_{trap} = 11\%$.

В области расширителя проведены измерения потока ионов мишенной плазмы, протекающей из центральной ячейки ГДЛ сквозь компактный пробкотрон в расширитель (рис. 6). При достижении максимальной плотности быстрых ионов в компактном пробкотроне, поток плазмы уменьшаются в 4 раза. Это соответствует т. н. амбиполярному эффекту.

В экспериментах с плотностью быстрых ионов выше $n_f > (2.5 - 3) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ зарегистрировано появление колебаний электростатического потенциала плазмы на частотах, близких к циклотронной частоте ионов в компактном пробкотроне. Эти колебания могут быть следствием развития микронеустойчивости, связанной с сильной анизотропией функции

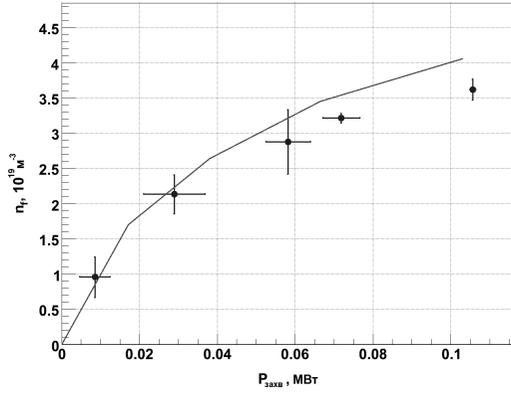


Рис. 5. Зависимость максимальной плотности быстрых ионов от мощности, захватываемой плазмой из атомарных пучков: точки – экспериментальные данные, кривая – расчёт кодом ITCS

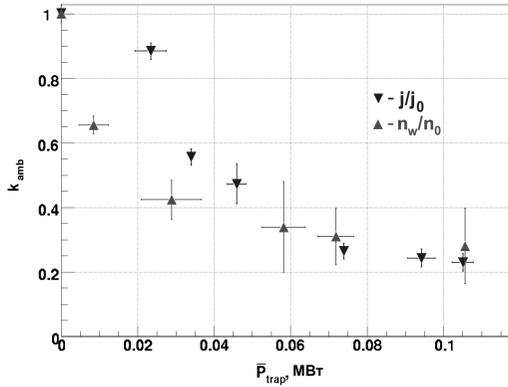


Рис. 6. Зависимости коэффициента подавления тока ионов на оси расширителя j/j_0 и отношения плотности тёплых ионов к плотности невозмущённой плазмы n_w/n_0 от мощности, захватываемой плазмой из атомарных пучков

распределения ионов в фазовом пространстве. Однако увеличения потерь, вызываемых микронеустойчивостью, не обнаружено.

Третья глава посвящена амбиполярному запираению продольных потерь из центральной ячейки через компактный пробкотрон. Эксперименты проводились аналогично тем, что были описаны в третьей главе. Целью было подробное исследование радиальных и временных зависимостей скорости потерь тёплой плазмы из центральной ячейки при накоплении быстрых ионов в компактном пробкотроне. Основные результаты экспериментов перечислены ниже. Поток ионов в расширителе на тепловых энергиях уменьшался до уровня шума в экспериментах с подавленными продольными потерями. Это указывает на амбиполярный способ подавления – ионы с энергиями ниже амбиполярного потенциала не выходят в расширитель. Зависимость продольных потерь от плотности быстрых ионов в компактном пробкотроне носит пороговый характер. Наибольшее подавление $j_0/j = 5$ наступает при плотности быстрых ионов $n_f = (3.5 - 4.5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, что соответствует амбиполярному потенциалу ниже электронной температуры. Радиальный профиль степени подавления плавно спадает от максимального значения 5 на оси до 1 на периферии.

В теоретической части четвёртой главы приведены оценки, описывающие амбиполярный эффект в разных предельных случаях. Показано, что сильное подавление потерь при амбиполярном потенциале порядка температуры не может быть получено ни в пределе частых, ни в пределе редких ион-ионных столкновений. Для качественной оценки промежуточного случая рассматривалась упрощённая модель. Функция распределения тёплых ионов в центральной ячейке определялась из решения кинетического уравнения со столкновительным членом в форме Крука. А движение ионов в пробочных узлах и компактном пробкотроне считалось бесстолкновительным. Результаты расчётов зависимости продольных потерь от длины установки, приведены на рисунке 7. Они позволяют качественно объяснить экспериментальные данные. Резкое уменьшение ионного тока связано с тем, что при нарастании амбиполярного потенциала “конус” потерь смещается в область высоких энергий где столкновения становятся более редкими и, соответственно, поток через границу “конуса” быстро уменьшается. Основным недостатком такой модели является простой вид столкновительного члена, который не учитывает диффузионный характер потока частиц в “конус” потерь в фазовом пространстве. Существенным отличием этой оценки от задачи о потерях из адиабатической ловушки, рассмотренных Пастуховым [9] (см. также [10]), является то, что “конус” потерь в задаче о ГДП нельзя считать пустым.

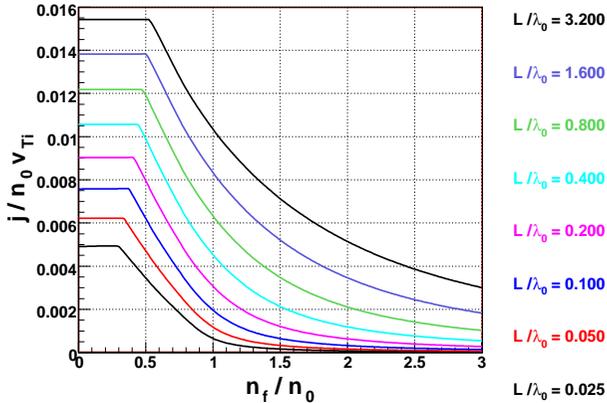


Рис. 7. Зависимости плотности потока ионов, нормированной на плотность плазмы в центральной ячейке n_0 и тепловую скорость ионов v_{Ti} , от плотности быстрых ионов в компактном пробкотроне, нормированной на n_0 . Расчёты проведены для равных температур ионов и электронов $T_e = T_i$ и разных соотношений длины установки к характерной длине пробега тёплого иона L/λ_0 . Графики расположены в порядке убывания L/λ_0 сверху вниз

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты

- Установлено, что в экспериментах с $\beta \geq 40\%$ на установке ГДЛ характерный радиус области, занимаемой быстрыми ионами со средней энергией ≈ 10 кэВ, близок к радиусу ларморовской окружности иона с поперечной энергией, равной энергии инжектируемых атомов. Показано, что столь узкие профили формируются за счёт переноса частиц к оси установки.
- Показано, что удержание быстрых ионов в эксперименте с компактным пробкотроном (КП) определяется в основном кинетикой парных кулоновских столкновений и процессом перезарядки на инжектируемых пучках. Плотность быстрых ионов в КП достигла $4.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при мощности атомарной инжекции около 800 кВт

и на порядок превысила плотность ионов тёплой плазмы в КП. Существенных потерь частиц и энергии, связанных с развитием микронеустойчивостей, не обнаружено, несмотря на высокую степень анизотропии быстрых ионов в пространстве скоростей $\langle W_{\perp} \rangle / \langle W_{\parallel} \rangle \sim 30$ и конечное значение параметра $\beta \approx 2.5\%$ в компактном пробкотроне.

- Продемонстрирован эффект уменьшения потока тёплой плазмы из центральной ячейки установки ГДЛ при формировании пика плотности быстрых ионов в компактном пробкотроне. Поток тёплых ионов в приосевой области ослаблялся в 5 раз, когда плотности горячих ионов в КП и тёплой плазмы в основном пробкотроне совпадали. Полученный результат объяснён переходом от случая полностью заполненного конуса потерь при низких значениях амбиоплярного потенциала, к случаю пустого конуса потерь при его значениях порядка температуры электронов.
- Создан специализированный анализатор, позволяющий измерять пространственные профили плотности потока атомов перезарядки в заданном диапазоне энергий. Совместно с атомарными пучками в качестве искусственной мишени прибор является штатной диагностикой для мониторингования пространственных распределений плотности горячих ионов в плазме ГДЛ.

**Основные результаты диссертации опубликованы
в следующих работах:**

1. *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, 2004, Vol.44, N4, P.542-547.
2. *A. Abdrashitov, G. Abdrashitov, A. Anikeev, P. Bagryansky, A. Beklemishev, P. Deichuli, A. Ivanov, S. Korepanov, V. Maximov, S. Murakhtin, A. Lizunov, V. Prikhodko, V. Kapitonov, V. Kolmogorov, A. Khil'chenko, V. Mishagin, V. Savkin, A. Shoukaev, G.I. Shulzhenko, A. Solomakhin, A. Sorokin, D. Stepanov, N.V. Stupishin, Yu. Tsidulko, A. Zouev, K. Noack, G. Fiksel, D.J. DenHartog,* Status of the GDT experiment and future plans. // Transactions of Fusion Science and Technology, 2005, Vol.47, N1T, P.27-34.

3. *P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, D.N. Stepanov, K. Noack, V.V. Prikhodko, A.L. Solomakhin.* First results from SHIP experiment. // Transactions of Fusion Science and Technology. 2005, Vol.47, N1T, P.59-62.
4. *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. // Transactions of Fusion Science and Technology, 2005, Vol.47, N1T, P.92-95.
5. *S.V. Murakhtin, V.V. Prikhodko.* Energy analyser for hot ion density profile measurements in GDT. // Transactions of Fusion Science and Technology, 2005, Vol.47, N1T, P.315-317.
6. *В.В. Приходько, А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, А.А. Лизунов, В.В. Максимов, С.В. Мурахтин, Ю.А. Цидулко.* Эффект формирования узкого радиального распределения плотности быстрых ионов в установке ГДЛ. // Физика плазмы, 2005, т.31, N11, с.969-977.
7. *A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, P.P. Deichuli, A.A. Ivanov, A.V. Kireenko, A.A. Lizunov, S.V. Murakhtin, V.V. Prikhodko, A.L. Solomakhin, A.V. Sorokin, N.V. Stupishin, S. Collatz and K.Noack.* The Synthesized Hot Ion Plasmoid experiment at GDT. // Fusion Sciences and Technology, 2007, Vol.51, N2T, P.79-81.
8. *A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, S.V. Murakhtin, V.V. Prikhodko, A.L. Solomakhin, and K. Noack.* Confinement of Strongly Anisotropic Hot-Ion Plasma in a Compact Mirror. // Journal of Fusion Energy, June 2007, Vol.26, P.103-107.
9. *A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, S.V. Murakhtin, V.V. Prikhodko, Yu.A. Tsidulko.* Formation and confinement of compact fast ion plasmoid in the gas dynamic trap. // 31st EPS Conference on Plasma Phys., London, 28 June - 2 July 2004 ECA V.28G, P.217 (2004).
10. *А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, А.А. Иванов, А.В. Киреев, А.А. Лизунов, В.В. Максимов, С.В. Мурахтин, В.В. Приходько, А.Л. Соломахин, А.В. Сорокин.* Накопление и удержание горячей анизотропной плазмы в компактном пробкотроне. // Тезисы докладов XXXV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 11-15 февраля 2008. - с.45.

11. *А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, А.Д. Беклжмишев, А.А. Иванов, А.В. Киреевко, К.Ю. Кириллов, М.С. Коржавина, А.А. Лизунов, В.В. Максимов, С.В. Мурачтин, Е.И. Пинженин, В.В. Приходько, Е.И. Солдаткина, А.Л. Соломахин.* Подавление продольных потерь в ГДЛ с помощью амбиполярной пробки. // Тезисы докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 9-13 февраля 2009. - с.47.

Список литературы

- [1] *Мирнов В.В., Рюттов Д.Д.* Газодинамическая линейная ловушка для удержания плазмы. // Письма в ЖЭТФ, 1979, т.5, с.678.
- [2] *Котельников И.А., Рюттов Д.Д., Цидулко Ю.А., Катыйшев В.В., Комин А.В., Кривошеев В.М.* Математическая модель источника нейтронов на основе газодинамической ловушки, Новосибирск, 1990, 43с. - (Препринт/Ин-т ядер. физики СО АН СССР; 90-105).
- [3] *Kruglyakov E.P.* High Power 14 MeV Neutron Sources for Test of Materials. // Transactions of Fusion Technology: an international journal of the American Nuclear Society, January 1999, v.35, N1T, p.20-29.
- [4] *Post R.F. and Rosenbluth M.N.*, Electrostatic Instabilities in Finite Mirror-Confined Plasmas. // Phys. Fluids, 1966, v.9, p.730-749.
- [5] *A. Ivanov, A. Karpushov, K. Lotov.* Synthesized Hot Ion Plasmoid. // Transactions of Fusion Technology, 1999, v.35, N1T, p.107-111.
- [6] *A.V. Anikeev, A.N. Karpushov, S. Collatz, K. Noack, G. Otto, S.L. Strogalova.* An Integrated Transport Code System for the Calculation of Multi-component, High- β Plasmas in the Gas Dynamic Trap. // Transaction of Fusion Technology, 2001, v.39, N1T, p.183-186.
- [7] *Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Ivanov A.A., Karpushov A.N., Korepanov S.A., Maximov V.V., Murachtin S.V., Smirnov A.Yu., Noack K., Otto G.* Fast ion relaxation and confinement in the gas dynamic trap. // Nuclear Fusion, 2000, v.40, N4, p.753-765.

- [8] *Tsidulko Yu.A.* Two-dimensional dynamics of two-component plasma with finite β . // *Physics of Plasmas*, 2004, v.11, p.4420-4428.
- [9] *Пастухов В.П.* Классические продольные потери плазмы в открытых адиабатических ловушках // В сб.: *Вопросы теории плазмы под редакцией Б.Б.Кадомцева*. - М.: Энергоатомиздат, 1984, вып.13, с.160-203.
- [10] *V.N. Khudik.* Longitudinal losses of electrostatically confined particles from a mirror device with arbitrary mirror ratio. // *Nuclear Fusion*, 1997, v.37, N2, p.189-198.