

На правах рукописи

СОЛДАТКИНА Елена Ивановна

ПОПЕРЕЧНОЕ УДЕРЖАНИЕ ПЛАЗМЫ
ПРИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ ВРАЩЕНИИ
В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

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:

Синицкий — кандидат физико-математических наук,
Станислав Леонидович Учреждение Российской академии наук,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

Федорук — доктор физико-математических наук,
Михаил Петрович Учреждение Российской академии наук,
Институт вычислительных технологий
СО РАН, г. Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ — Институт ядерного синтеза
ОРГАНИЗАЦИЯ: РНЦ “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 Российской 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. На установке ГДЛ (газодинамическая ловушка) в течение ряда лет ведется экспериментальное исследование предложенной в [1] концепции удержания плазмы в открытой ловушке с большим пробочным отношением и длиной, превышающей среднюю длину рассеяния ионов в конус потерь. Название системы связано с тем, что продольное течение плазмы в таких условиях описывается по существу уравнениями газовой динамики. Стационарное состояние плазмы в ловушке поддерживается за счет баланса двух эффектов: инжекции атомарных пучков на участке однородного магнитного поля и потерь плазмы через пробки.

Физика продольного удержания плазмы в ГДЛ довольно проста, поэтому для получения нужного для реакторных приложений времени удержания достаточно увеличить пробочное отношение, насколько это возможно, и увеличить длину ловушки до нужной величины. Здесь же кроется и главный недостаток ГДЛ с точки зрения реакторных приложений. Даже при использовании максимально достижимых на сегодняшний день величин магнитного поля в пробках минимальная длина термоядерного реактора на основе газодинамической ловушки должна превышать несколько километров [2].

Такая длина сегодня кажется слишком большой, однако принципиально не закрывает перспективы развития термоядерных реакторов на основе ГДЛ в будущем. Более того, вероятные прорывы в области создания сверхсильных магнитных полей могли бы вывести газодинамическую ловушку в лидирующее положение с точки зрения перспектив использования в качестве термоядерного реактора.

Помимо возможности создания термоядерного реактора, на основе ГДЛ может быть построен относительно дешевый и компактный источник нейтронов D-T реакции с энергией 14 МэВ и плотностью мощности потока $\sim 1 - 4$ МВт/м². Создание такого источника для ускоренного испытания материалов и узлов будущего термоядерного реактора необходимо для решения задачи поиска материалов, обладающих адекватной нейтронной стойкостью, для создания первой стенки D-T реакторов [3, 4, 5, 6]. Существенное достоинство нейтронного генератора на основе ГДЛ состоит в том, что в нем в принципе достижимы $\beta \sim 1$, что позволяет создать относительно компактную установку с малой потребляемой мощностью и расходом трития [5].

Помимо применений в фундаментальных исследованиях в области физики твердого тела и термоядерного материаловедения, источник ней-

тронов имеет также перспективы в качестве устройства для “дожигания” радиоактивных отходов, получения радиоизотопов, а также в качестве гибридной энергетической установки с высокой степенью внутренней безопасности [7, 8].

МГД устойчивость двухкомпонентной плазмы высокого давления в осесимметричном пробкотроне является одним из наиболее важных вопросов программы исследований на установке ГДЛ.

Настоящая работа связана с проблемой МГД устойчивости плазмы с высоким значением параметра β в ГДЛ. Особое внимание уделено изучению влияния радиального профиля электрического потенциала. Радиальное электрическое поле определяет радиальный профиль скорости азимутального дрейфа плазмы, что может существенно повлиять на МГД устойчивость системы.

Цель работы состояла в экспериментальной демонстрации возможности стационарного устойчивого удержания плазмы с относительным давлением $\beta \approx 40\%$, что необходимо для обоснования проекта нейтронного источника на основе газодинамической ловушки.

Научная новизна. Впервые разработана методика стабилизации плазмы в полностью симметричной открытой ловушке при помощи механизма дифференциального вращения. Экспериментально доказана возможность использования этой методики для обеспечения устойчивого удержания плазмы с относительным давлением $\beta \approx 40\%$ в газодинамической ловушке. Впервые получены рекордные значения температуры ($T_e \approx 200$ эВ) в ГДЛ именно в режимах с дифференциальным вращением. Проанализирована эффективность использования дополнительных торцевых ячеек – расширителя и антипробкотрона – для стабилизации плазмы в ГДЛ, проведено сравнение такой стабилизации с методом ширового вращения, сделан вывод в пользу большей эффективности последнего.

Апробация диссертации. Работы, положенные в основу диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск). Кроме того, результаты работы докладывались на Всероссийской конференции по физике плазмы и УТС (2006-2008, Звенигород), Международной конференции “Open Magnetic System for Plasma Confinement” (2006 – Цукуба, Япония), Международной конференции “EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics” (2005 – Таррагона, Испания, 2006 – Рим, Италия, 2007 – Варшава, Польша).

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Вклад автора. Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автор участ-

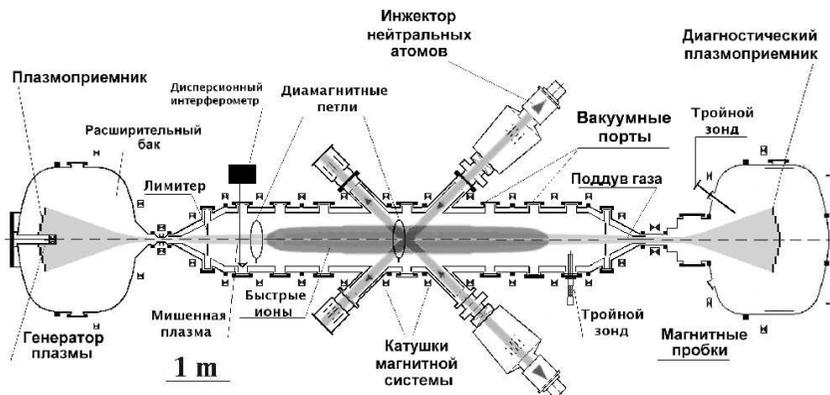


Рис. 1. Схема установки ГДЛ.

вовал в проведении всех экспериментов, представленных в диссертации, разработал конструкцию зонда и методику измерения поперечных потерь плазмы.

Практическое значение результатов. Исследования, описанные в диссертации, являются экспериментальной демонстрацией возможности использования метода подавления желобковой неустойчивости дифференциальным вращением для проекта нейтронного источника на основе ГДЛ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Текст диссертации содержит 127 страниц и 57 рисунков. Список литературы состоит из 64 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении приводится описание установки ГДЛ, на которой проводились исследования, изложены основные физические принципы удержания плазмы в ловушке, обоснована важность поставленной в работе задачи.

Установка представляет собой осесимметричный пробкотрон длиной 7 метров с пробочным отношением $R = 33$, предназначенный для удержания двухкомпонентной плазмы (рис. 1). Одна из компонент — столкновительная мишенная плазма с изотропной в пространстве скоростей максвелловской функцией распределения частиц — имеет температуру электронов и ионов до 150 эВ и плотность $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Для этой компоненты характерен газодинамический режим удержания, так как

длина пробега ионов относительно рассеяния в конус потерь не превышает длину ловушки. Другая компонента — быстрые ионы со средней энергией ~ 10 кэВ и плотностью до $4 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ — образуется в результате мощной атомарной инжекции. Для данной компоненты характерен бесстолкновительный режим удержания, который определяется сохранением адиабатического инварианта — магнитного момента. Энергия инжектируемых частиц при этом составляет 18 — 25 кэВ при мощности до 4.2 МВт. Относительное давление плазмы в пробкотроне достигает $\beta = 8\pi n \langle E_{\perp} \rangle / B^2 \approx 0.4$ [9], где n и $\langle E_{\perp} \rangle$ — плотность и средняя поперечная энергия быстрых ионов, соответственно, а B — магнитная индукция, величина которой в экспериментах составляла 0.27 Т в центральной плоскости установки.

На установке осуществляется моделирование физических процессов в генераторе нейтронов при меньшем уровне параметров плазмы, а также проводится ряд исследований, направленных на изучение физики удержания плазмы как в газодинамической ловушке, так и в открытых магнитных системах других типов.

В первой главе приведен обзор предшествующих работ, посвященных тематике МГД стабилизации в газодинамической ловушке. Обсуждаются различные эффекты, влияющие на устойчивость плазмы в ГДЛ. В их число входят: стабилизация течением плазмы, плещущимися ионами, дополнительными торцевыми ячейками, эффекты конечного ларморовского радиуса, дестабилизирующее влияние радиального электрического поля. Приведены оценки влияния этих эффектов на устойчивость в ГДЛ с учетом нынешней конфигурации магнитного поля и параметров плазмы.

Вторая глава посвящена обсуждению возможности влияния контакта плазмы с проводящими радиальным и торцевыми лимитерами на ее МГД устойчивость, приводятся результаты серии экспериментов, из которых можно сделать выводы о роли этого эффекта в ГДЛ.

Третья глава содержит описание экспериментов по проверке влияния ширового вращения плазмы. Такое вращение реализуется при формировании специального радиального профиля электрического потенциала в ловушке и влияет на подавление поперечных потерь, возникающих при развитии желобковой неустойчивости.

Радиальный профиль электрического потенциала формировался при помощи радиальных и торцевых лимитеров, на которые подавались различные напряжения в диапазоне 50 — 200 В. При этом время удержания частиц мишенной плазмы соответствовало характерному времени ее газодинамического истечения через пробки ловушки, а время жизни

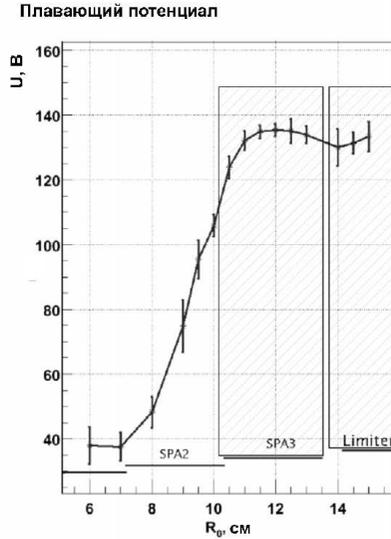


Рис. 2. Радиальный профиль плавающего потенциала в центральной плоскости ГДЛ при подаче потенциала на радиальные и торцевые лимитеры.

быстрых частиц соответствовало времени их торможения за счет кулоновских столкновений с электронами мишенной плазмы [10]. На рис.2 показан радиальный профиль плавающего потенциала, полученный при помощи ленгмюровского зонда при подаче на лимитер и внешнее кольцо плазмоприемника напряжения ≈ 130 В, внутренние электроды при этом были заземлены. Видно, что на периферии создается электрическое поле, величина которого составляет около 30 В/см. Таким образом, при наличии перепада радиального потенциала в плазме реализуется механизм дифференциального вращения в образовавшихся скрещенных полях – аксиальном магнитном и радиальном электрическом. Время половины оборота внешнего слоя плазмы относительно внутреннего при таком вращении оказывается одного порядка со временем развития МГД неустойчивости. Был сделан вывод о том, что дифференциальное вращение может подавлять развитие МГД неустойчивости или существенно уменьшать инкремент ее развития, изменяя распределение зарядов, приводящее к развитию неустойчивости.

Для сравнения была проведена серия экспериментов, в которых все электроды были заземлены. В этом случае плавающий потенциал зонда не имел перепадов по радиусу. Этот режим удержания характеризовался как неустойчивый, так как время удержания теплой плазмы и время жизни быстрых частиц были примерно в 3 раза меньше, чем в устойчивых режимах.

Известно, что дифференциальное вращение плазмы может оказывать как стабилизирующее действие на устойчивость системы, так и приводить к аномальному переносу частиц поперек поля в системах с магнитным удержанием плазмы (токамаки [11], стеллараторы [12]). Для измерения этого поперечного потока был сконструирован так называемый комбинированный зонд, принцип работы которого описан в ряде работ (например, [13]). Основной целью создания такого зонда было стремление индикаторно подтвердить или опровергнуть наличие аномального переноса в режимах с шировым вращением. В данной главе приводится описание принципа работы и конструкции зонда, а также алгоритм обработки данных. По результатам экспериментов был сделан вывод о том, что в режимах с дифференциальным вращением аномальный поперечный перенос отсутствует.

Также было показано, что метод подавления желобковой неустойчивости при помощи дифференциального вращения остается эффективным при переходе к стационарному удержанию плазмы в ловушке при увеличении длительности атомарной инжекции с 1 до 5 мс. Употребляя выражение “стационарный режим”, мы имеем ввиду то, что фаза устойчивого удержания в ГДЛ в этом режиме в несколько раз превышает характерные временные масштабы в плазме – время газодинамического удержания мишенной компоненты и время жизни популяции быстрых ионов. В режимах с шировым вращением были получены максимальные значения температуры и относительного давления плазмы ($\sim 40\%$).

В стационарном режиме удержания были проведены эксперименты по изучению порога описываемого эффекта дифференциального вращения. Измерялось энергосодержание быстрых ионов в зависимости от подаваемого на радиальные электроды напряжения (рис.3). Из зависимости 3 видно, что характер удержания плазмы меняется уже заметно при напряжении на лимитере порядка $30 \div 50$ В, хотя при больших напряжениях происходит заметное изменение параметров плазмы. Однако, только при 100 В в плазме отсутствуют колебания с частотами более 10 кГц.

Здесь же приводится теоретическое описание механизма улучшения удержания, а также результаты исследования применимости такого метода подавления потерь к режиму стационарного удержания плазмы.

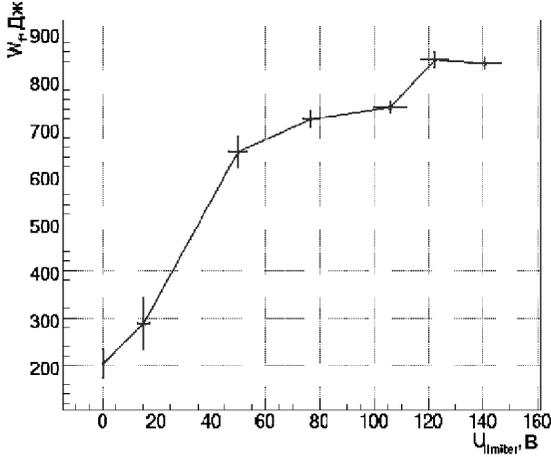


Рис. 3. Зависимость энергосодержания быстрых ионов от напряжения на лимитере.

Теоретическое описание обсуждаемых механизмов стабилизации было дано в работе [14].

В указанной работе найдено стационарно вращающееся распределение потенциала $\varphi(r)$ в системе, где первая желобковая мода насыщается и амплитуда смещения перестает экспоненциально зависеть от времени, как это происходит на линейной стадии. То есть смещение плазменного столба относительно положения равновесия можно представить течением с постоянной скоростью поперек магнитного поля. Потенциал торцевого приемника плазмы задает граничное условие вдоль магнитного поля и имеет вид ступеньки, что соответствует реальному эксперименту. В работе также показано, что при создании достаточно большого потенциала в периферийном слое плазмы с толщиной, много меньшей её радиуса, линии потока плазмы образуют замкнутые контуры, препятствующие радиальному переносу частиц.

Ключевым критерием, говорящим об эффективности стабилизации, в описываемой теории является ширина слоя, в котором реализуется скачок потенциала. Авторы дают оценку для этой величины относительно радиуса плазмы:

$$\frac{\Delta r}{a} \sim \frac{\sqrt{T_e}}{a^2}. \quad (1)$$

Для обеспечения устойчивости описываемым механизмом необходимо,

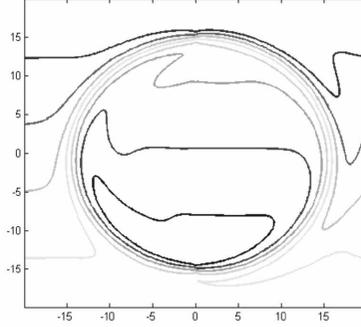


Рис. 4. Линии тока плазмы в сечении, перпендикулярном магнитному полю, при $\Delta\varphi_w = T_e/e$.

чтобы выполнялось условие $\Delta r/a \ll 1$, где Δr – ширина слоя, в котором реализуется скачок потенциала (для ГДЛ это ≈ 5 см), a – радиус плазмы, равный 14 см. Тогда создание скачка потенциала в плазме модифицирует линии тока, создаваемые первой модой желобковой неустойчивости так, что они могут замыкаться. Это приводит к уменьшению поперечного переноса в ловушке. Такой эффект носит пороговый характер и зависит от величины скачка потенциала ($\Delta\varphi_w$). Когда он становится порядка электронной температуры, линии тока замыкаются (рис.4). Этот факт также подтвержден в серии экспериментов на ГДЛ, где по данным дисперсионного интерферометра и по диамагнитным сигналам быстрых ионов можно было судить о режиме удержания плазмы при подаче различного потенциала на лимитер. Наблюдалось существенное увеличение времени удержания при потенциале на лимитере +100 В.

Описанная теоретическая модель позволяет сделать некоторые оценки о применимости метода стабилизации приложенными потенциалами для проекта нейтронного источника на основе ГДЛ. Для базового варианта такого источника предусмотрены следующие параметры ([4]): электронная температура $T_e = 1.1$ кэВ, плотность быстрых ионов $1.2 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, радиус плазмы $a = 8$ см, пробочное отношение $R = 15$. Используя оценку 1 и приняв удовлетворительной ту степень эффективности стабилизации, какая она есть на сегодняшний день в ГДЛ, а электронную температуру увеличить примерно в 10 раз относительно сегодняшней, как того требует проект нейтронного источника, то радиус плазмы следует увеличить всего в 1.78 раза.

Можно также оценить, какую часть от полной мощности нагрева со-

ставляют затраты на описываемый метод стабилизации. Эта оценка позволит обосновать применимость метода для нейтронного источника на основе ГДЛ. Считая, что вся затрачиваемая в системе мощность расходуется на нагрев плазмы, а потери – только продольные, можно оценить мощность потерь, как выносимую из центральной ячейки электронно-ионной парой, а затрачиваемую на стабилизацию мощность – как произведение перепада потенциала в слое на ток, текущий в этом слое. В результате отношение мощностей оказывается равным

$$\frac{W_{stab}}{W_{total}} = 0.02. \quad (2)$$

Оценка 2 позволяет заключить, что метод стабилизации, требующий затрат мощности, составляющих единицы процентов от полной мощности нагрева системы, может быть применен в термоядерных установках класса нейтронного источника на основе газодинамической ловушки.

В четвертой главе описаны эксперименты по обеспечению стабилизации желобковой неустойчивости в ГДЛ методом создания благоприятной средней кривизны магнитных силовых линий в ловушке, то есть с использованием дополнительных торцевых ячеек – расширителя и антипробкотрона.

Для оценки эффективности метода стабилизации радиальным электрическим полем, описываемого в данной работе, было предложено сравнить его с методом стабилизации торцевыми ячейками, которые изначально являлись основными средствами достижения МГД устойчивости в ГДЛ. Очень важным мотивом для проведения экспериментов с МГД якорями была также возможность осуществления моделирования метода увеличения их стабилизирующих свойств за счет инжекции газа в запробочную область ловушки. При этом предполагалось, что дополнительная плазма, образованная за счет ионизации газа, будет увеличивать газодинамический напор в расширителе или давление в антипробкотроне. Мощность, необходимая для ионизации газа и нагрева дополнительной плазмы, при этом должна поступать из центральной ячейки по каналу электронной теплопроводности. Такой метод был предложен в проекте нейтронного источника на основе ГДЛ [3].

Кроме того, очень важной с точки зрения экспериментального обоснования проекта источника нейтронов представляется демонстрация возможности обеспечения МГД устойчивости при помощи якорей в условиях, близких к стационарным. Это стало реализуемо после увеличения длительности атомарной инжекции до 5 мс, что примерно втрое превы-

шает характерное время продольного удержания частиц при газодинамическом истечении столкновительной компоненты плазмы.

В экспериментах с использованием расширителя в качестве МГД-якоря конфигурация магнитного поля в установке изменялась таким образом, чтобы кривизна силовых линий в запробочной области была благоприятной для МГД-устойчивости согласно критерию Розенблюта-Лонгмайра. Необходимая кривизна обеспечивалась катушками магнитного поля, охватывающими торцевые баки. Токи в этих катушках направлены противоположно токам катушек центрального соленоида. При работе с расширителем измерялся поток ионов, вытекающих из пробки, а также плотность и температура в расширителе в зависимости от радиуса. На основе этих данных, а также знаний о параметрах плазмы в центральной ячейке, вычислялся “запас устойчивости”, определяемый как модуль отношения интеграла по стабилизатору к интегралу по центральной части:

$$Q = \left| \frac{I_{exp}}{I_{cc}} \right|, \quad (3)$$

который оказался равен $Q = 0.38 < 1$, что говорит о недостаточности стабилизирующих свойств расширителя. Даже при постоянном поддуве газа в режиме с расширителем стационарного удержания достигнуть не удавалось и энергосодержание в этом режиме было на 50% меньше, чем в режимах с дифференциальным вращением. Температура же не превышала 70 эВ (по сравнению со 150 эВ в лучших режимах с инъекцией атомарных пучков водорода).

Также были проведены эксперименты по изучению стабилизирующих свойств антипробкотрона (полукаспа). Для этого в магнитную систему установки были включены дополнительные катушки, установленные внутри и вне расширительного бака. В этих катушках токи текут в разных направлениях, создавая на оси “ноль поля”. Таким образом достигается нужная положительная кривизна силовых линий. Лимитеры и торцевые плазмодриемники были заземлены во всех экспериментах. Температура в центральной ячейке в режимах с каспом и инъекцией водородных пучков не превышала 110 эВ, а энергосодержание было на 30% меньше, чем при реализации ширового вращения. Для режимов с водородной инъекцией был рассчитан “запас устойчивости”, который оказался близок к единице.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты, полученные в работе

- Показано, что при неблагоприятной относительно МГД-устойчивости конфигурации магнитного поля в заправочной области ГДЛ вынос импульса в расширитель и наличие в нем плазмы с ненулевой плотностью играют существенную роль, однако эти эффекты не приводят к качественному изменению процесса развития желобковой неустойчивости.
- Экспериментально доказано, что в условиях экспериментов на установке ГДЛ желобковая неустойчивость не может быть подавлена за счет контакта плазмы с радиальными и торцевыми лимитерами.
- Обосновано предположение о возможности подавления поперечных потерь при развитии желобковой неустойчивости в ГДЛ путем создания внутри плазмы области с дифференциальным вращением, которая образуется при формировании перепада электрических потенциалов на коаксиальных секциях радиальных и торцевых лимитеров.
- Проведено экспериментальное обоснование теоретической модели, описывающей механизм подавления радиальных потерь при дифференциальном вращении плазмы в ГДЛ. Обнаружено удовлетворительное совпадение экспериментальных результатов с предсказаниями теории. Результаты теоретического рассмотрения позволяют рекомендовать указанный метод для снижения поперечных потерь плазмы в проектируемом источнике нейтронов на основе газодинамической ловушки.
- Реализовано удержание плазмы в стационарных режимах с дифференциальным вращением. В этих условиях достигнуты максимальные на сегодняшний день для ГДЛ параметры: температура электронов $T_e \approx 150$ эВ (при инжекции водородных пучков), относительное давление $\beta \approx 40\%$ (при инжекции дейтериевых пучков), плотность быстрых ионов $n_f \approx 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Сравнение результатов измерений и численного моделирования в этом режиме показывает, что в приосевой области плазмы потери энергии и частиц определяются продольным газодинамическим истечением.
- Изучена эффективность стабилизации при помощи МГД-якоря - антипробкотрона в режиме стационарного удержания. Для увеличения “запаса устойчивости” реализован метод инжекции газа в

антипробкотрон, предложенный ранее в рамках проекта источника нейтронов на основе ГДЛ. Указанная мера позволила удвоить энергосодержание быстрых ионов по сравнению с соответствующей величиной, полученной ранее в аналогичном режиме. Согласно результатам оценки, относительное давление достигло $\beta \approx 13\%$, при величине “запаса устойчивости” $Q \approx 1$.

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

1. P.A.Bagryansky, E.I. Soldatkina, Influence of radial electric field on high-beta plasma confinement in the gas dynamic trap. // Book of Abstracts of 33th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Rome, June 19 - 23, 2006, ECA, Vol.30I, P1.175.
2. P. A. Bagryansky, A. D. Beklemishev, M.S. Chaschin, E.I. Soldatkina, Radial Electric Fields and Radial Currents in the Gas Dynamic Trap. // Fusion Science and Technology, Volume 51, Number 2T, 2007 Pages 337-339.
3. P.A. Bagryansky, A.D. Beklemishev, E.I. Soldatkina, Influence of Radial Electric Field on High-Beta Plasma Confinement in the Gas Dynamic Trap. //Fusion Science and Technology Volume 51, Number 2T, 2007, Pages 340-342.
4. A.V.Anikeev, P.A.Bagryansky, A.S.Donin, A.A.Ivanov, A.V.Kireenko, A.A.Lizunov, V.V.Maximov, S.V.Murakhtin, V.V.Prikhodko, E.I.Soldatkina, A.L.Solomakhin, D.N.Stepanov, Confinement and MHD-stability of high-beta anisotropic plasma in the Gas Dynamic Trap. // Proc. of the 34th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (2-6 July 2007, Warsaw, Poland) ECA (2007).
5. П.А. Багрянский, Е.И. Солдаткина, А.Л. Соломахин, Влияние пристеночной плазмы на МГД устойчивость в газодинамической ловушке. // Тезисы докладов XXXIV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2007, С.55.
6. А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, А.Д. Беклемишев, А.В. Киреевко, А.А. Лизунов, В.В. Максимов, С.В. Мурахтин, В.В. Приходько, Е.И. Солдаткина, А.Л. Соломахин, М.С. Чащин, Методы МГД стабилизации двухкомпонентной плазмы в газодинамической ловушке.

// Тезисы докладов XXXV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2008, С.33.

7. Е.И. Солдаткина, П.А. Багрянский, А.Л. Соломахин, Влияние радиального профиля электрического потенциала на удержание двухкомпонентной плазмы с высоким бета в газодинамической ловушке. // Физика Плазмы, 34, 2008, вып.4, С.291-296.

Список литературы

- [1] *Мирнов В.В., Рюттов Д.Д.* Газодинамическая линейная ловушка для удержания плазмы. // Письма в ЖЭТФ, 1979, т.5, с.678.
- [2] *Мирнов В.В., Рюттов Д.Д.* Газодинамическая ловушка. // В сб. Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез. - М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1980, вып.1(5), с.57-66.
- [3] *Bagryansky P.A., Ivanov A.A., Kruglyakov E.P. et al.* // Fusion Engineering and Design 2004, v.70, p.13-33.
- [4] *Котельников И.А., Рюттов Д.Д., Цидулко Ю.А., Катмышев 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).
- [5] *Ivanov A.A., Rytov D.D.* Mirror-based neutron sources for fusion technology studies. // Nucl. Science and Engineering, 1990, v.106, p.235.
- [6] *Ivanov A.A., Kotel'nikov I.A., Kruglyakov E.P., et. al.* A plasma-type neutron source for fusion materials irradiation testing. // Proc. of the 17th Symposium on Fusion Technology, /ed. C.Ferro, M.Gasparotto, H.Knoepfel. - 1992, Rome, v.2, p.1394.
- [7] *Кривошеев М.В., Катмышев В.В.* // Вопросы Атомной Науки и Техники, сер. Термоядерный синтез, 1988, N2, с.12.
- [8] *Post R.F., Fowler T.K., Kileen J., Mirin A.A.* Concept for a high-power-density mirror fusion reactor. // Phys. Rev. Lett., 1973, v.31, p.280.
- [9] *Ivanov A.A., Bagryansky P.A., Anikeev A.V. et al.,* Experimental Evidence of High-Beta Plasma Confinement in an Axially Symmetric Gas Dynamic Trap. // Phys. Rev. Lett., 2003, v.90, N10, p.105002-1-105002-4.

- [10] *Котельников И.А., Росляков Г.В., Рютов Д.Д.* Стабилизация желобковых возмущений в осесимметричной открытой ловушке с плещущимися ионами. // Физика плазмы, 1987, т.13, вып.4, с.403.
- [11] *R. Kumar and S.K. Saha* Temperature fluctuations and turbulent transport at the edge of the SINP tokamak // Nuclear Fusion, 2003, v.43, p.622-628.
- [12] *E. Calderon, C. Hidalgo and M.A. Pedrosa.* On the interpretation of fluctuation and $E \times B$ turbulent transport measured by Langmuir probes in fusion plasmas. // Rev. of Sci. Instrum., 2004, v.75, N10, p.4293-4295.
- [13] *T.L. Rodes, Ch.P. Ritz, R.D. Bengston, K.R. Carter.* Fast reciprocating probe system used to study edge turbulence on TEXT. // Rev. of Sci. Instrum., 1990, v.61, N10, p.3001-3003.
- [14] *A.D. Beklemishev* Shear Flow Effects in Open Traps. // Theory of Fusion Plasmas, AIP Conference Proceedings, 2008, 1069, v.3-14.