

*На правах рукописи*

**ЗАЙЦЕВ Константин Владимирович**

**ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКИ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ В ГДЛ  
МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ**

**01.04.08 – физика плазмы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**НОВОСИБИРСК – 2016**

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

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ПРИХОДЬКО  
Вадим Вадимович – кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ПЕТРОВ  
Юрий Викторович – кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе Российской  
академии наук, г. Санкт-Петербург, старший  
научный сотрудник.

ШАПИРО  
Давид Абрамович – доктор физико-математических наук,  
профессор, Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки Институт  
автоматики и электротехники СО РАН,  
г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Национальный исследова-  
тельский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва.

Защита диссертации состоится « 28 » декабря 2016 г.  
в « 10:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

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 СО РАН.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

На сегодняшний день на установке Газодинамическая Ловушка (ГДЛ), которая построена в ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, были получены рекордные для ловушек открытого типа параметры в режимах с дейтериевой плазмой (быстрые атомарные пучки дейтонов инжектируются в дейтериевую плазму с начальной температурой 2–3 эВ): максимальное бета в точках отражений быстрых ионов равно 0.6 и температура электронов равная 650 эВ. Такие параметры позволяют весьма обоснованно рассматривать вопрос о практическом применении источника нейтронов на основе “двухкомпонентного” варианта ГДЛ в ближайшие десятилетия и придают актуальность исследованиям физических процессов, наблюдаемых в установках этого типа.

**Цель работы** состоит в исследовании физики удержания плазмы в ГДЛ в режимах работы с высоким относительным давлением при помощи магнитных диагностик. Это предполагает:

- изучение спектральных характеристик альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости и её влияния на эффективность удержания плазмы в ГДЛ;
- исследование длинноволновых продольных колебаний магнитного поля в диапазоне от 90 до 100 кГц;
- описание структуры нелинейно насыщенных желобковых колебаний плазменного столба ГДЛ в режиме с вихревым удержанием.

### **Личный вклад автора**

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автором были созданы системы низкочастотной и высокочастотной магнитных диагностик на установке ГДЛ, разработано соответствующее программное обеспечение для обработки получаемых экспериментальных данных. На основе анализа данных полученных с магнитных диагностик автором установлены характеристики альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости (АИЦН) возбуждающейся в ГДЛ, выделена группа резонансных частиц ответственных за возбуждение АИЦН, изучены нелинейно насыщенные желобковые колебания плазмы, удерживающейся в ГДЛ в режиме вихревого удержания, а также спектральные характеристики длинноволновых продольных колебаний магнитного поля в диапазоне от 90 до 100 кГц.

### **Научная новизна**

Впервые в ловушке с наклонной инжекцией изучены спектральные характеристики АИЦН и рассмотрено её влияние на эффективность удержания плазмы. В ходе изучения спектральных характеристик АИЦН и

анализа данных с комплекса магнитных диагностик ГДЛ также были изучены спектральные характеристики нелинейно насыщенных желобковых колебаний плазмы, удерживающейся в ГДЛ в режиме вихревого удержания, и длинноволновых продольных колебаний магнитного поля в диапазоне от 90 до 100 кГц, которые могут быть идентифицированы как глобальная звуковая мода. Оба эти явления, также как и АИЦН, были зарегистрированы и изучались на ГДЛ впервые.

### **Научная и практическая ценность**

Среди практически значимых результатов особо следует отметить то, что развитие АИЦ неустойчивости не приводит к ухудшению удержания плазмы в ГДЛ и, по сути, никаких специальных мер по стабилизации АИЦН в промышленном нейтронном источнике на её основе при сохранении текущих параметров принимать не нужно. Кроме того, полученные в ходе экспериментов данные полезны для проверки теоретических моделей, позволяющих вычислять порог возникновения АИЦ неустойчивости и её влияние на рассеяние частиц плазмы в открытых ловушках с наклонной инжекцией. Также экспериментальные данные могут быть полезны для уточнения моделей описывающих процессы, происходящие в естественных магнитных ловушках расположенных в магнитосферах планет. Эти процессы обуславливают спектр частиц, заселяющих магнитосферу, и, в конечном итоге, оказывают влияние на формирование космической погоды вокруг планет.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Показано, что при увеличении давления плазмы в ГДЛ развивается альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость. Измерен порог развития неустойчивости и характеристики неустойчивых возмущений, которые находятся в хорошем согласии с предсказаниями теории.
2. Установлено, что возбуждение в плазме альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости не приводит к существенному ухудшению удержания быстрых ионов в ГДЛ. В частности, нейтронный выход D-D реакции в точке остановки быстрых ионов при развитии неустойчивости уменьшается не более чем на 5%.
3. Обнаружено, что в процессе нагрева в плазме ГДЛ развиваются длинноволновые осесимметричные возмущения магнитного поля. Частота возмущений очень слабо зависит от температуры и диамагнетизма плазмы: сдвиг частоты не превышает 10% при изменении этих величин в несколько раз.
4. Показано, что в соответствии с предсказаниями теории колебания плазменного столба в ГДЛ в режиме с вихревым удержанием имеют желобковый характер и в спектре азимутальных мод доминируют моды  $m = 1, 2$ .

### **Апробация диссертации**

Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на Международных конференциях по физике плазмы и УТС (2012 и 2014, г. Звенигород), XV конференции по диагностике высокотемпературной плазмы (2013, г. Звенигород), Международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (2012, г. Цукуба, Япония), Международной конференции по физике плазмы PLASMA 2013 (2013, г. Варшава, Польша), опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

По результатам диссертации опубликовано 5 работ в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК [1, 2, 3, 4, 5].

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложена на 83 страницах, включая 36 иллюстраций, и содержит 47 наименований библиографии.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обсуждается актуальность поставленной научной задачи, демонстрируются новизна и значимость полученных в работе результатов.

**В первой главе** представлен обзор предшествующих теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению АИЦ неустойчивости.

Возбуждение АИЦН связано с анизотропией давления плазмы и конечным значением величины  $\beta$  (бета), которая представляет собой отношение давления плазмы к давлению магнитного поля. Как ясно из названия, неустойчивость развивается в результате циклотронного резонанса ионов плазмы с альфвеновской волной, т.е. частицы передают свою энергию такой альфвеновской волне, чья частота, вследствие эффекта Доплера, сравнивается с какой-нибудь гармоникой их собственной циклотронной частоты. Впервые в лабораторной плазме АИЦН была зарегистрирована на установке ТМХ, располагавшейся в Ливерморе [6]. В описываемых экспериментах неустойчивость возбуждалась в концевых ячейках ТМХ, куда велась почти перпендикулярная по отношению к силовым линиям магнитного поля инжекция атомарных пучков. Данные полученные на установке ТМХ были успешно обоснованы — отклонение теоретических расчётов от экспериментальных результатов находится в пределах 5%.

Возможность развития АИЦН при наклонной инжекции впервые обсуждалась в статье [7], но до сих пор отсутствовали экспериментальные данные об условиях развития и параметрах АИЦН на установках с наклонной инжекцией, а значит и соответствующие теоретические предсказания проверены не были. Отметим, что на установке ТМХ-U (средний угол инжекции  $70^\circ$ ) были зарегистрированы колебания в ожидаемом диапазоне

частот, но подробно они не изучались и как АИЦН идентифицированы не были [8]. Устранить данный «пробел» и существенно дополнить базу знаний по АИЦН позволяют данные, полученные в экспериментах на установке ГДЛ.

Наилучшим образом условия эксперимента на установке ГДЛ аппроксимируют расчёты и оценки, приведённые в работе [9]. В данной работе численно исследуется граница АИЦН в неоднородной в продольном и поперечном направлениях плазме с плещущимися ионами и строится пространственное распределение возмущения полей. Равновесная функция распределения ионов, близкая к той, что реализуется в эксперименте на установке ГДЛ, находится в результате аппроксимации решения приближенного уравнения Фоккера–Планка. Исходя из оценок, приведённых в данной работе, в случае ГДЛ существует простое приближенное соотношение между параметрами волны и инжекции  $|\omega - \Omega_{ci}| \approx |k_{\parallel} v_{inj}|$ , где

$v_{inj}$  – продольная скорость инжектируемых частиц.

**Вторая глава** содержит описание установки ГДЛ и основных диагностик, использовавшихся для получения экспериментальных данных.

Установка ГДЛ (см. рисунок 1) представляет собой аксиально-симметричный пробкотрон длиной 7 м, с полем в центре до 3.5 кГс и максимальным пробочным отношением  $R = 35$ . Пробочное отношение  $R$  – это отношение величины магнитного поля в пробочных катушках к магнитному полю в центральной плоскости ловушки.

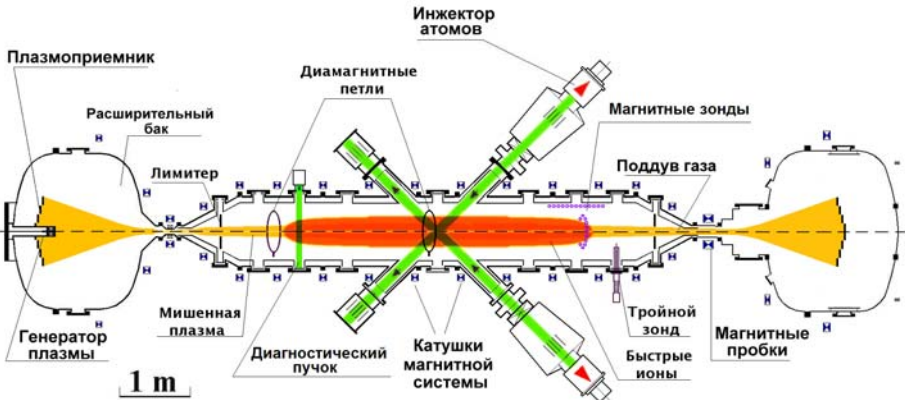


Рисунок 1. Схема установки ГДЛ.

Плазма в ГДЛ представлена двумя компонентами: тёплой плазмой и горячими ионами. Тёплая (мишенная) компонента удерживается в столкновительном режиме и имеет изотропное максвелловское распределение в пространстве скоростей. Горячие (быстрые) ионы,

накапливающиеся в результате захвата мощных атомарных пучков с начальной энергией 22 – 25 кэВ на тёплой плазме, имеют анизотропную функцию распределения и удерживаются в слабостолкновительном режиме. Средняя энергия горячих ионов около 10 кэВ. Важно отметить, что функция распределения быстрых ионов по питч-углам (угол между скоростью быстрого иона и осью установки) остаётся достаточно узкой вплоть до энергий порядка нескольких кэВ. Это приводит к формированию достаточно коротких областей остановки, где плотность быстрых ионов достигает максимума ( $\sim 10^{14}$  частиц/см<sup>3</sup>).

Для регистрации длинноволновых продольных колебаний на звуковой частоте [10], также как и для изучения спектральных характеристик нелинейно насыщенных желобковых колебаний плазмы [11], в ГДЛ используется низкочастотная (НЧ) магнитная диагностика. Текущая реализация данной диагностики включает в себя одиночный магнитный зонд расположенный в районе «восточной» точки остановки быстрых частиц и две сборки магнитных зондов, линейную и круговую, расположенные в «западной» части центральной ячейки ГДЛ (см. рисунок 2). Каждый НЧ зонд представляет из себя катушку диаметром 7 см, состоящую из 100 витков и ориентированную таким образом, чтобы регистрировать динамику изменения радиального магнитного поля, создаваемого преимущественно быстрой плазменной компонентой. Линейная сборка расположена вдоль оси установки и включает в себя 18 датчиков, расставленных с шагом 10 см. Расстояние от оси установки до линейной сборки и до одиночного датчика в «восточной» части центральной ячейки составляет порядка 30 см. Круговая сборка диаметром 40 см расположена по азимуту центрального соленоида и состоит из 16 симметрично расположенных магнитных зондов.

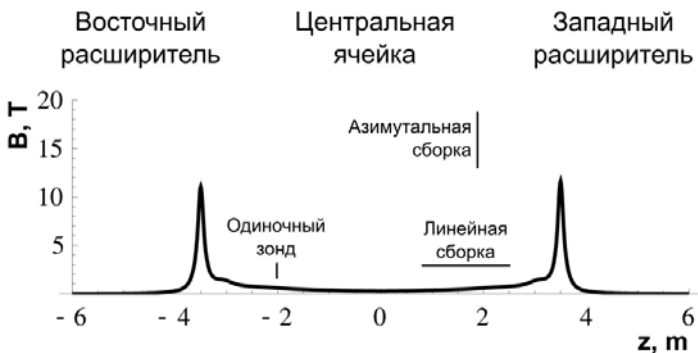


Рисунок 2. Схема размещения низкочастотных датчиков относительно профиля продольного вакуумного магнитного поля в ГДЛ на оси симметрии.

В целях изучения флуктуаций магнитного поля на частотах порядка ионно-циклотронной частоты (примерно 2.4 МГц для дейтронов в центральной плоскости при магнитном поле 3.2 кГс) магнитная диагностика

ГДЛ была дополнена набором высокочастотных (ВЧ) магнитных зондов (схема размещения ВЧ-зондов представлена на рисунке 3). Линейная сборка ВЧ зондов состоит из шести датчиков, расположенных с шагом 20 – 30 см на длине чуть более одного метра. Каждый из этих датчиков состоит из трех вложенных взаимно ортогональных витков диаметром 1 см. В свою очередь каждый виток предназначен для измерения производной соответствующей ему компоненты магнитного поля: радиальной, продольной или азимутальной. Наводимая на витках этих датчиков ЭДС позволяет определить поляризацию, направление распространения волны и пространственную зависимость продольного волнового числа. Для изучения азимутальной структуры высокочастотных колебаний используется азимутальная сборка из 4-х ВЧ магнитных зондов, расположенных в угловых координатах  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $67.5^\circ$  и  $157.5^\circ$ . Датчики азимутальной сборки имеют ту же геометрию, что и датчики на линейной сборке. Однако, азимутальные датчики содержат только один виток, предназначенный для изучения динамики радиального магнитного поля регистрируемых электромагнитных волн. Азимутальная сборка установлена таким образом, что её продольная координата совпадает с продольной координатой ближайшего к центральной плоскости ВЧ датчика на линейной сборке, а угловая координата линейной сборки составляет  $- 22.5^\circ$ . В результате, при изучении пространственной азимутальной структуры возбуждаемых в плазме колебаний для корреляционного анализа может быть использовано до пяти сигналов одновременно. Расстояние от оси симметрии установки до ВЧ датчиков азимутальной и линейной сборок составляет 27 см. Ещё один ВЧ магнитный зонд с тремя витками, аналогичный зондам на линейной сборке, был установлен на радиальной подвижке за пробкой в западном расширителе. Он предназначен для изучения радиального профиля поляризации возбуждаемых плазмой электромагнитных колебаний.

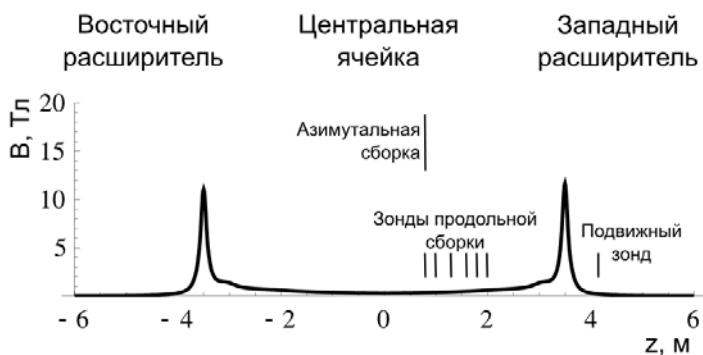


Рисунок 3. Схема размещения высокочастотных датчиков относительно профиля продольного вакуумного магнитного поля в ГДЛ на оси симметрии.



**В третьей главе** приведены описание и результаты проведённых экспериментов, связанных с изучением АИЦН. В частности, выделяется группа резонансных частиц, ответственных за развитие данной неустойчивости, а также освещается вопрос влияния АИЦН на эффективность удержания частиц в ГДЛ.

Первый параграф посвящен определению типа электромагнитных колебаний с частотой порядка ионно-циклотронной, которые возбуждаются в режимах с достаточно высоким энергосодержанием и были предварительно идентифицированы как АИЦН. Из анализа сигналов с ближайшего к центральной плоскости датчика линейной сборки ВЧ зондов следует, что в момент развития неустойчивости характерная частота этих колебаний примерно равна 1.15 МГц. Кроме того установлено, что регистрируемая волна имеет эллиптическую поляризацию и направление вращения поляризации регистрируемой волны в месте расположения датчика совпадает с направлением вращения электронов.

Радиальная зависимость разности фаз между сигналами с радиального и азимутального витков ВЧ-датчиков представлена на рисунке 4. Каждая окружность на графике соответствует данным полученным в одном из выстрелов. Положительная разность фаз соответствует вращению вектора поляризации в направлении вращения ионов, а отрицательная, соответственно, электронов. Координаты на оси абсцисс пересчитаны на центральную плоскость. В этих координатах, смена направления вращения с «ионного» на «электронное» происходит в диапазоне от 7 до 9 см. Похожие свойства альфвеновских волн наблюдались при изучении АИЦН на установке GAMMA-10 [12], а также в экспериментах Lehane и Paoloni [13].

Также гипотезу о возбуждении АИЦН подтверждает азимутальная структура рассматриваемых колебаний. По результатам корреляционного анализа сигналов с ВЧ-зондов азимутальной сборки было установлено, что возбуждающаяся в результате развития неустойчивости волна имеет наименьшую несимметричную азимутальную моду  $m = 1$ . Положительный знак моды означает, что волна в азимутальном направлении распространяется в сторону диамагнитного дрейфового тока ионов.

В качестве решающего аргумента для определения типа возбуждающейся неустойчивости нами был вычислен диапазон продольных скоростей резонансных частиц из условия циклотронного резонанса  $k_{\parallel} V_{\parallel} = \omega - \Omega_{ci}$ . Из полученных в эксперименте данных следует, что за развитие неустойчивости ответственны частицы, чьи продольные скорости удовлетворяют условию  $|v_{\parallel res}| \geq |v_{\parallel inj}|$ . То есть сформулированное в работе [9] условие  $|\omega - \Omega_{ci}| \approx |k_{\parallel} v_{\parallel inj}|$  выполняется.

На основании приведенных выше аргументов был сделан вывод, что наблюдаемые флуктуации магнитного поля являются результатом развития АИЦН.

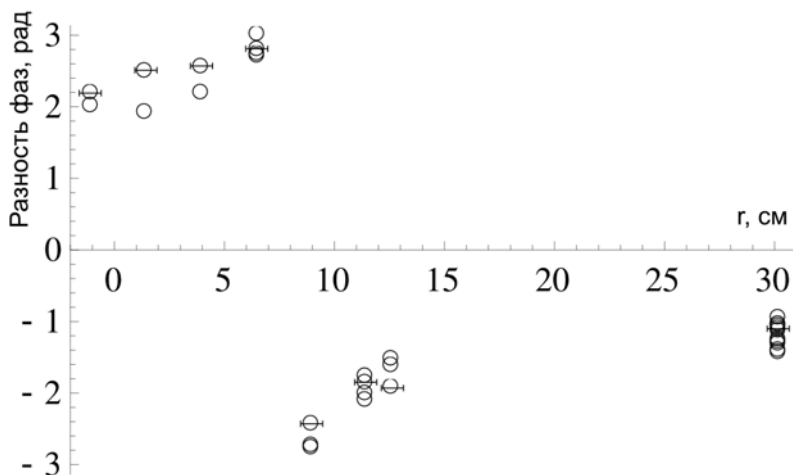


Рисунок 4. Радиальный профиль поляризации. Вдоль оси ординат отложена разность фаз сигналов с радиального и азимутального витков подвижного ВЧ-датчика, расположенного в расширителе, ( $r < 15$  см) и ближайшего к центральной плоскости ВЧ-датчика на линейной сборке ( $r \approx 30$  см). Координаты на оси абсцисс пересчитаны на центральную плоскость.

Вопрос влияния АИЦН на эффективность удержания частиц в ГДЛ освещается во втором и третьем параграфах. В частности, на основании данных, полученных при помощи сцинтилляционного датчика, показано, что возбуждение неустойчивости приводит к уменьшению выхода продуктов D-D реакции на величину не более 5%. Из этого можно сделать вывод, что в условиях эксперимента ГДЛ АИЦ неустойчивость значительного влияния на удержание плазмы не оказывает.

**В четвёртой главе** приведены данные по изучению длинноволновых продольных колебаний магнитного поля в диапазоне от 90 до 100 кГц. Данные колебания отчётливо проявляются на протяжении всего эксперимента при значении диамагнетизма в районе точки остановки быстрых частиц более 10 кМкс и имеют младшую азимутальную моду  $m=0$ . Продольную структуру наблюдаемых колебаний можно понять из анализа фаз сигналов с зондов линейной сборки и одиночного зонда в «восточной» части центральной ячейки. На протяжении всей линейной сборки низкочастотных зондов (1.8 м) возмущение давления имеет почти одинаковую фазу. То есть длина продольной сборки меньше половины длины волны. Данные с одиночного зонда и симметричного ему относительно центральной плоскости зонда с линейной сборки показывают, что колебаний давления плазмы в противоположных точках остановки ловушки имеют противоположные фазы. Учитывая, что длина ловушки не

покрытая зондами не превышает 0.8 м, можно с высокой долей вероятности предположить, что регистрируемая волна является стоячей и имеет продольную моду (количество узлов между точками отражения)  $N=1$  по давлению.

Одной из отличительных особенностей этих колебаний является то, что большую часть времени их частота не изменяется в ходе эксперимента и не покидает обозначенного выше узкого диапазона. При этом глобальные параметры плазмы, например, температура и диамагнетизм, изменяются в несколько раз.

**Пятая глава** описывает спектральные характеристики нелинейно насыщенных желобковых колебаний плазмы, удерживающейся в ГДЛ в режиме с вихревым удержанием.

О том, что колебания действительно носят желобковый можно судить исходя из сигналов, регистрируемых при помощи продольной сборки низкочастотных магнитных зондов. На всей протяженности продольной сборки фазы сигналов совпадают с точностью 10%.

Теория вихревого удержания [11] предсказывает наличие нелинейно насыщенных желобковых колебаний плазмы с младшими азимутальными модами. Старшие моды должны быть подавлены за счёт эффектов конечности ларморовского радиуса. По данным с круговой сборки НЧ зондов стандартный сценарий развития эксперимента в таком режиме можно описать следующим образом (нуль по времени соответствует моменту включения инжекторов):

- в период 0 – 1 мс: нет четко выраженных колебаний, амплитуды малы;
- в период 1 – 2 мс: колебания с азимутальным числом (модой)  $m = 1$ ;
- в период 2 – 4 мс: колебания с азимутальным числом (модой)  $m = 2$ .

Характерные значения частоты сигнала для первой моды примерно равны 40 кГц, для второй – 20 кГц. Исходя из аналитических выкладок, приведенных в статье [11], следует, что измеряемая частота

$$f = f_v - f_{amb} \cdot m, \text{ где } f_v \text{ пропорциональна прикладываемому для}$$

реализации вихревого удержания напряжению на периферии плазмы, а  $f_{amb}$

– частота амбиполярного вращения, определяемая радиальным профилем температуры. Таким образом, изменение частоты при переходе от одной моды к другой также согласуется с теоретическими представлениями.

**В заключении** изложены основные результаты, полученные в диссертации:

1. Показано, что при увеличении давления плазмы в ГДЛ развивается альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость.
2. Измерен порог развития АИЦ неустойчивости и характеристики неустойчивых возмущений, которые находятся в хорошем согласии с предсказаниями теории.

3. Установлено, что возбуждение в плазме АИЦН не приводит к существенному ухудшению удержания быстрых ионов в ГДЛ. В частности, нейтронный выход D-D реакции в точке остановки быстрых ионов при развитии неустойчивости уменьшается не более чем на 5%.
4. По полученным в эксперименте данным была установлена группа резонансных частиц, ответственных за возбуждение неустойчивости – это частицы, чьи продольные скорости удовлетворяют условию  $|v_{||res}| \geq |v_{||inj}|$ .
5. Обнаружено, что в процессе нагрева в плазме ГДЛ развиваются длинноволновые осесимметричные возмущения магнитного поля. Частота возмущений очень слабо зависит от температуры и диамагнетизма плазмы: сдвиг частоты не превышает 10% при изменении этих величин в несколько раз.
6. Показано, что в соответствии с предсказаниями теории колебания плазменного столба в ГДЛ в режиме с вихревым удержанием имеют желобковый характер и в спектре азимутальных мод доминируют моды  $m = 1, 2$ . Изменение частоты вращения плазменного столба при переходе от одной доминирующей моды к другой также согласуется с теоретическими представлениями.

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

1. P.A. Bagryansky, A.D. Beklemishev, K.V. Zaytsev, I.A. Kotelnikov, V.V. Maximov, V.V. Prikhodko, A.N. Pushkareva, E.Yu. Kolesnikov, E.I. Soldatkina, Yu.A. Tsidulko. Low-frequency oscillations of plasma in the gas dynamic trap. // Fusion Science and Technology, Vol. 59, N 1T, 2011, pp. 94-97.
2. D.I. Skovorodin, K.V. Zaytsev and A.D. Beklemishev. Global sound modes in mirror traps with anisotropic pressure. // Phys. Plasmas, 20, 2013, 102123.
3. K.V. Zaytsev, A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.S. Donin, Yu.V. Kovalenko, M.S. Korzhavina, A.A. Lizunov, A.N. Lozhkina, V.V. Maximov, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, V.Ya. Savkin. Magnetic measurements at the GDT facility. // Fusion Science and Technology, Vol. 63, N 1T, May 2013, pp. 346-348.
4. K.V. Zaytsev, A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.S. Donin, O.A. Korobeinikova, M.S. Korzhavina, Yu.V. Kovalenko, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, V.Ya. Savkin, D.V. Yakovlev. Kinetic instability observations in the Gas Dynamic Trap, Physica Scripta, Vol. 2014 Number T161, 014004.
5. А.В. Анিকেев, П.А. Багрянский, К.В. Зайцев, О.А. Коробейникова, С.В. Мурахтин, Д.И. Сковородин, Д.В. Юров. Энергетический спектр продольных потерь ионов в ГДЛ при развитии альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости // Физика плазмы, 11, 2015.

## Список литературы

- [1] D.I. Skovorodin, K.V. Zaytsev and A.D. Beklemishev. Global sound modes in mirror traps with anisotropic pressure. // *Phys. Plasmas*, 20, 2013, 102123.
- [2] А.В. Аникеев, П.А. Багрянский, К.В. Зайцев, О.А. Коробейникова, С.В. Мурахтин, Д.И. Сквородин, Д.В. Юров. Энергетический спектр продольных потерь ионов в ГДТ при развитии альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости // *Физика плазмы*, 11, 2015.
- [3] P.A. Bagryansky, A.D. Beklemishev, K.V. Zaytsev, I.A. Kotelnikov, V.V. Maximov, V.V. Prikhodko, A.N. Pushkareva, E.Yu. Kolesnikov, E.I. Soldatkina, Yu.A. Tsidulko. Low-frequency oscillations of plasma in the gas dynamic trap // *Fusion Science and Technology*, Vol. 59, N 1T, 2011, pp. 94-97.
- [4] K.V. Zaytsev, A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.S. Donin, Yu.V. Kovalenko, M.S. Korzhavina, A.A. Lizunov, A.N. Lozhkina, V.V. Maximov, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, V.Ya. Savkin. Magnetic measurements at the GDT facility // *Fusion Science and Technology*, Vol. 63, N 1T, May 2013, pp. 346-348.
- [5] K.V. Zaytsev, A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, A.S. Donin, O.A. Korobeinikova, M.S. Korzhavina, Yu.V. Kovalenko, A.A. Lizunov, V.V. Maximov, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, V.Ya. Savkin, D.V. Yakovlev. Kinetic instability observations in the Gas Dynamic Trap // *Physica Scripta*, Vol. 2014 Number T161, 014004.
- [6] T.A. Casper, G.R. Smith. Observation of Alfvén ion cyclotron fluctuations in the end-cell plasma in the Tandem Mirror Experiment // *Physical Review Letters*, Vol. 48, No. 15, 1982.
- [7] G.R. Smith. Alfvén ion-cyclotron instability in tandem-mirror plasmas. I // *The Physics of Fluids*, Vol. 27, No. 6, 1984.
- [8] G.R. Smith, W.M. Nevins, W.M. Sharp. Alfvén ion-cyclotron instability in tandem-mirror plasmas. II // *The Physics of Fluids*, Vol. 27, No. 8, 1984.
- [9] Ю.А. Цидулко, И.С. Черноштанов. Альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость в аксиально-симметричной ловушке с наклонной инжекцией быстрых атомов // *Физика плазмы*, Т. 40, № 12, 2014. С. 1074-1083.
- [10] D.I. Skovorodin, K.V. Zaytsev, A.D. Beklemishev. Global sound modes in mirror traps with anisotropic pressure // *Phys. Plasmas*, Vol. 20, 2013. P. 102123.
- [11] A.D. Beklemishev, P.A. Bagryansky, M.S. Chashin, E.I. Soldatkina. Vortex confinement of plasma in symmetric mirror traps // *Fusion science and technology*, Vol. 57, 2010.
- [12] R. Katsumata, M. Ichimura, M. Inutake, H. Hojo, A. Mase, T. Tamano. Eigenmode excitation of Alfvén ion cyclotron instability // *Physics of Plasmas*, Vol. 3, No. 12, 1996. pp. 4489-4495.
- [13] J.A. Lehan, F.J. Paoloni. The propagation of non-axisymmetric Alfvén waves in an argon plasma // *Plasma Physics*, Vol. 14, 1972. P. 701.

ЗАЙЦЕВ Константин Владимирович

**Изучение физики удержания плазмы в ГДЛ  
методом магнитной диагностики**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Сдано в набор 18.10.2016 г.

Подписано в печать 19.10.2016 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.9 усл. печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 22

---

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

*Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*