

*На правах рукописи*

**ЧЕРНОШТАНОВ Иван Сергеевич**

**АЛЬФВЕНОВСКАЯ ИОННО-ЦИКЛОТРОННАЯ  
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ОТКРЫТЫХ ЛОВУШКАХ  
С ИНЖЕКЦИЕЙ ПУЧКОВ БЫСТРЫХ АТОМОВ**

**01.04.08 – физика плазмы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**НОВОСИБИРСК – 2015**

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

#### НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЦИДУЛКО  
Юрий Александрович – кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Новосибирск.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ТИМОФЕЕВ  
Александр Владимирович – доктор физико-математических наук,  
профессор, Курчатовский комплекс физико-  
химических технологий Национального  
исследовательского центра «Курчатовский  
институт», г. Москва, главный научный  
сотрудник.

ШАПИРО  
Давид Абрамович – доктор физико-математических наук,  
профессор, Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки Институт  
автоматики и электрометрии Сибирского  
отделения Российской академии наук,  
г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 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 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Плазма в открытых ловушках, как правило, термодинамически неравновесна, что связано со способами ее создания и нагрева. Неравновесность может приводить к возбуждению различных кинетических неустойчивостей, одной из которых является альфвеновская ионно-циклотронная (АИЦ) неустойчивость. Развитие АИЦ неустойчивости приводит к появлению циркулярно поляризованных волн с частотой порядка ионной циклотронной, распространяющихся преимущественно вдоль внешнего магнитного поля.

АИЦ неустойчивость может увеличивать эффективную частоту столкновений ионов и изменять их среднюю энергию, влияя таким образом на потери частиц и энергии из ловушки. Так, на установке ТМХ развитие АИЦ неустойчивости в концевых пробкотронах приводило к нагреву ионов в центральной ячейке, что увеличивало потери ионов из центральной ячейки через амбиполярные барьеры и ограничивало эффективность амбиполярного запираания. В центральной ячейке ловушки ГАММА-10 из-за высокой анизотропии плазмы развивается АИЦ неустойчивость, которая усиливает диффузию быстрых ионов по питч-углу, что уменьшает их время жизни в ловушке. В магнитосфере развитие АИЦ неустойчивости приводит к дополнительному рассеянию ионов, которое ограничивает анизотропию ионной функции распределения.

Распределение ионов при нормальной инжекции моделируется, как правило, максвелловским распределением с различными температурами вдоль и поперек магнитного поля ловушки (би-максвелловское распределение). Изучению границы АИЦ неустойчивости в би-максвелловской плазме посвящено большое количество работ, однако плазма, как правило, предполагается либо однородной [1, 2, 7], либо умеренно анизотропной [3],  $\mathcal{A} \equiv T_{\perp}/T_{\parallel} \ll L/\rho_{\perp}$  (где  $L$  – размер неоднородности магнитного поля ловушки). В первом случае исследование границы устойчивости сводится к изучению свойств корней дисперсионного соотношения, во втором случае плазма слабонеоднородна и применимыми оказываются ВКБ-методы, использующие локальное дисперсионное соотношение. Как показано в первом разделе первой главы диссертации, в случае высокой анизотропии  $\mathcal{A} \gg L/\rho_{\perp}$  из-за сильной продольной неоднородности плазмы ВКБ-методы оказываются неприменимыми.

В случае наклонной инжекции атомарных пучков функция распределения ионов оказывается достаточно сложной, что затрудняет получение удобного для анализа границы устойчивости тензора диэлектрической

проницаемости. Для изучения линейной стадии АИЦ неустойчивости в ловушке с наклонной инжекцией в работах [4, 5] используются модельные распределения. Однако, как показывает решение уравнения Фоккера-Планка, при параметрах центральной ячейки ГДЛ функция распределения заметно отличается от модельных распределений работ [4, 5]. Кроме того, в этих работах пренебрегается поперечной неоднородностью плазмы, которая в случае центральной ячейки ГДЛ ( $r_p \sim \rho_\perp$ ) существенно влияет на границу устойчивости.

Экспериментальное изучение АИЦ неустойчивости в открытых ловушках показывает, что частотный спектр возмущений узок, при этом состояние нелинейного насыщения можно приближенно представить в виде монохроматической волны с круговой поляризацией. Такое электромагнитное поле обладает высокой симметрией; движение частиц в нем полностью интегрируемо [6]. Таким образом, представляется интересным поиск точных спирально-симметричных решений уравнений Максвелла-Власова и построение на их основе модели, описывающей нелинейное насыщение АИЦ неустойчивости в открытой ловушке.

**Целью диссертационной работы** является теоретическое изучение АИЦ неустойчивости в открытых ловушках, в которых в качестве основного метода нагрева и поддержания баланса частиц плазмы выступает мощная атомарная инжекция, в качественно новых областях параметров, не охваченных предыдущими работами. Это предполагает:

изучение границы АИЦ неустойчивости в ловушке с сильно анизотропной плазмой, когда размер пространственной дисперсии сравним с размером неоднородности плазмы и традиционные ВКБ методы оказываются неприменимыми;

изучение границы АИЦ неустойчивости в ловушке с наклонной инжекцией атомарных пучков с использованием функций распределения ионов, близких к тем, что реализуются в эксперименте, и учете продольной и поперечной неоднородности плазмы;

создание модели нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости в ловушке с атомарной инжекцией с использованием нелинейных спирально-симметричных решений уравнений Власова-Максвелла.

**Личный вклад автора.** Все результаты диссертации получены либо лично автором, либо при его решающем участии. Автором получено интегральное уравнение для АИЦ возмущений в сильно анизотропной плазме и создан численный код для его решения, создан численный код для поиска в ВКБ-приближении границы устойчивости неоднородной плазмы с наклонной атомарной инжекцией, создана теоретическая модель

нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости, основанная на нелинейных решениях уравнений Власова-Максвелла.

**Научная новизна** работы заключается в том, что

- впервые получено интегральное уравнение для поперечных возмущений с частотой порядка ионной циклотронной в неоднородной сильно анизотропной би-максвелловской плазме, и создан код для его численного решения;
- получен новый скейлинг границы АИЦ неустойчивости в би-максвелловской плазме, справедливый при большой анизотропии и предсказывающий стремление порогового  $\beta_{\perp}$  к постоянному ненулевому значению при неограниченном увеличении анизотропии;
- создан алгоритм аппроксимации функции распределения ионов в ловушке с наклонной инжекцией, позволяющий выразить тензор диэлектрической проницаемости плазмы через аналитические по параметрам возмущения и координатам функции. Получено дисперсионное соотношение для поперечных возмущений, учитывающее поперечную неоднородность плазмы. Разработан метод поиска границы устойчивости с помощью усредненной поправки Перлштейна-Берка. Создан численный код для расчетов в рамках ВКБ-приближения границы устойчивости неоднородной плазмы с наклонной инжекцией и исследованы зависимости порогового  $\beta_{\perp}$  и частоты возмущения от параметров инжекции и геометрии ловушки;
- исследовано поведение возмущения магнитного поля в периферийной плазме. Показано, что направления вращения волны вблизи оси и на периферии могут различаться в зависимости от параметров плазмы. Найдена оценка условия изменения направления вращения;
- описан класс точных спирально-симметричных решений уравнений Власова-Максвелла. Впервые получено кинетическое уравнение, описывающее стационарное распределение ионов в плазме с атомарной инжекцией и волной с круговой поляризацией произвольной амплитуды. Создан код для численного поиска параметров нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости при произвольных параметрах инжекции. В пределе волны малой, но конечной амплитуды, и малого разброса скоростей инжектируемых ионов найдено аналитическое решение кинетического уравнения и получены выражения, связывающие параметры волны с параметрами инжекции.

**Научная и практическая значимость работы** состоит в том, что созданные теоретические и численные модели могут использоваться для расчета границы устойчивости и параметров нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости в ловушках с атомарной инжекцией и для проектирования будущих экспериментов, направленных на достижение термоядерных параметров в открытых ловушках. Описание поведения полей в периферийной плазме полезно для интерпретации экспериментального наблюдения АИЦ неустойчивости. Теоретическая модель нелинейного насыщения может служить основой для изучения влияния АИЦ неустойчивости на процессы переноса частиц и энергии в открытых ловушках.

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

- Граница АИЦ неустойчивости и распределения возмущений полей в ловушке с сильно анизотропной ( $A \gg L/\rho_{\perp}$ ) би-максвелловской плазмой.
- Новый скейлинг для границы АИЦ неустойчивости в неоднородной би-максвелловской плазме в пределе бесконечно большой анизотропии.
- Граница АИЦ неустойчивости и распределения возмущений полей в аксиально-симметричной ловушке с наклонной инжекцией быстрых атомов в рамках ВКБ-приближения с использованием функции распределения ионов, удовлетворяющей приближенному уравнению Фоккера-Планка, и с учетом продольной и поперечной неоднородности.
- Описание поведения возмущения магнитного поля в периферийной плазме. Условия смены направления вращения волны в периферийной плазме.
- Модель нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости в однородной плазме с инжекцией атомарных пучков, основанная на спирально-симметричных решениях уравнений Власова-Максвелла.

### **Апробация работы**

Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на научных семинарах ИЯФ СО РАН (Новосибирск), на двух Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (2011 и 2012), на 8-й международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (OS-2010, July 5-9, Novosibirsk, Russia), на 9-й международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (OS-2012, August 27-31, Tsukuba, Japan).

Результаты диссертации опубликованы также в российских и зарубежных научных журналах, список которых приведен в перечне опубликованных автором работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и четырех приложений. Диссертация содержит 88 страниц, 22 рисунка и библиографический список из 41 работы.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** дается краткий обзор теоретических и численных подходов к решению задачи о нахождении границы АИЦ неустойчивости в плазме с различными функциями распределения ионов, и к задаче об определении структуры полей и функций распределения частиц на нелинейной стадии неустойчивости. Также обосновывается актуальность исследования и формулируются задачи, решению которых посвящена работа.

**В первой главе** исследуется линейная стадия АИЦ неустойчивости в ловушке с сильно анизотропной би-максвелловской (ионы имеют максвелловское распределение с различными температурами вдоль и поперек магнитного поля ловушки) плазмой, содержащей добавку холодных изотропных ионов. Предполагается, что анизотропия распределения горячих ионов  $\mathcal{A} \equiv T_{\perp}/T_{\parallel}$  удовлетворяет условию  $\mathcal{A} \gg L/\rho_{\perp}$ , где  $L$  – размер неоднородности магнитного поля и  $\rho_{\perp} \equiv (2T_{\perp}/m_i)^{1/2}/\Omega_{ci}$  – средний ларморовский радиус анизотропных ионов. Также, радиус плазмы  $r_p$  считается большим по сравнению с  $\rho_{\perp}$ .

В первом разделе приводятся оценки параметров плазмы и возмущения на границе устойчивости, и обсуждаются условия применимости ВКБ-методов. АИЦ неустойчивость развивается вследствие интегральной инверсной заселенности траекторий резонансных ионов, для которых выполняется условие циклотронного резонанса  $\omega - \Omega_{ci} = k_{\parallel}v_{\parallel}$ , где  $k_{\parallel}$  есть продольная компонента волнового вектора возмущения. В случае би-максвелловской плазмы условие инверсной заселенности приводит к ограничению частоты и волнового вектора неустойчивого возмущения,  $\omega/\Omega_{ci} < 1 - 1/\mathcal{A}$  и  $k_{\parallel}^2\rho_{\perp}^2 < \beta_{\perp}\mathcal{A}(1 - 1/\mathcal{A})^2$  [1, 2], где  $\beta_{\perp}$  есть отношение давления плазмы к давлению магнитного поля. Поскольку длина волны возмущения также ограничена размером плазмы  $l = L/\sqrt{\mathcal{A}}$ , можно оценить параметры плазмы на границе устойчивости  $\beta_{\perp} \sim \rho_{\perp}^2/(\mathcal{A}l^2) = \rho_{\perp}^2/L^2$ . Показано, что в случае большой анизотропии ( $\mathcal{A} \gg L/\rho_{\perp}$ ) размер пространственной дисперсии сравним с продольным размером анизотропной плазмы, что приводит к неприменимости ВКБ-методов, основанных на

использовании локального дисперсионного соотношения. В этих условиях для описания линейной стадии необходимо использовать интегральное уравнение для электрического поля возмущения, которое можно получить из системы уравнений Власова-Максвелла.

Во втором и третьем разделах приводится вывод интегрального уравнения для возмущений в сильно анизотропной би-максвелловской плазме. Из условия  $\mathcal{A} \gg L/\rho_{\perp}$ , эквивалентного  $l/L \ll \sqrt{\rho_{\perp}/L} \ll 1$ , следует, что магнитное поле ловушки слабо меняется на траектории движения горячего иона. Это позволяет существенно упростить выражение для вклада горячих ионов в оператор диэлектрической проницаемости плазмы. При вычислении вкладов холодных ионов и электронов пренебрегается их тепловым движением, продольные зависимости плотностей находятся из бoльцмановского распределения и условия нейтральности. Предположение  $r_p \gg \rho_{\perp}$  позволяет учесть поперечную неоднородность с помощью эффективного поперечного волнового вектора, при этом в интегральном уравнении остается зависимость только от продольной координаты. В итоге получена задача на собственные значения с одномерным линейным интегральным оператором для фурье-компонент электрического поля.

В четвертом разделе рассматривается предел бесконечно большой анизотропии. В этом пределе найдено аналитическое решение интегрального уравнения, спектр собственных функций и собственных значений на границе устойчивости, и показано, что энергия и магнитное поле возмущения локализованы на размере анизотропной плазмы. Получен скейлинг критерия устойчивости

$$\beta_{\perp} \frac{L^2}{\rho_{\perp}^2} \equiv \frac{\omega_{pi}^2 L^2}{c^2} < 3, \quad (1)$$

где  $\omega_{pi}$  – плазменная частота ионов в центре ловушки. Условие (1) согласуется со сделанными в первом разделе оценками, полученными из требования ограничения длины волны неустойчивого возмущения размером анизотропной плазмы. Также найдена поправка к граничному  $\beta_{\perp}$  от малой добавки холодной плазмы  $\delta\beta_{\perp}/\beta_{\perp} = -4\sqrt{\mathcal{A}n_{c0}/n_{h0}}$ , где  $n_{h0}$  и  $n_{c0}$  – плотности горячих и холодных ионов в центре ловушки.

Использование конечно-разностной аппроксимации интеграла позволяет свести численное решение интегрального уравнения к поиску собственных векторов и собственных значений симметричной комплексной матрицы. Создан код для численного решения интегрального уравнения и исследована зависимость параметров плазмы и частоты возмущения на границе устойчивости от анизотропии и плотности холодной плазмы при параметрах, близких к параметрам компактного пробкотрона ГДЛ.

Результаты численных расчетов и их сравнение с аналитическими результатами приведены в пятом разделе. Продемонстрирована немонотонная зависимость граничного  $\beta_{\perp}$  от плотности холодной плазмы, исследована зависимость  $\beta_{\perp}$  от анизотропии и показано, что с ростом анизотропии оно стремится к значению, предсказываемому скейлингом (1). Показано, что результаты расчетов параметров плазмы на границе устойчивости для параметров компактного пробкотрона ГДЛ согласуются с экспериментальными данными.

**Во второй главе** в рамках ВКБ-приближения исследуется линейная стадия АИЦ неустойчивости в ловушке с наклонной инжекцией атомарных пучков в холодную мишенную плазму. Продольный размер изменения параметров (порядка размера неоднородности магнитного поля  $L$ ) считается много большим поперечного,  $L \gg r_p$ , где  $r_p$  – радиус плазмы. Учитывается конечное отношение давления плазмы к давлению магнитного поля.

В первом разделе второй главы приведены предварительные оценки параметров неустойчивого возмущения. В случае наклонной инжекции условие интегральной инверсной заселенности может выполняться только для ионов с энергией порядка энергии инжекции, откуда следует простая связь между продольной скоростью инжекции  $v_{\parallel inj}$  и параметрами волны,  $\omega - \Omega_{ci} \approx k_{\parallel} v_{\parallel inj}$ . Также в первом разделе оценена длина волны неустойчивого возмущения и показана применимость ВКБ-методов для поиска границы устойчивости.

Для использования ВКБ методов требуется дисперсионное соотношение, допускающее продолжение в область комплексных координат и параметров волны. Во втором разделе описан использованный метод аппроксимации функции распределения. В качестве функции распределения ионов используется стационарное решение приближенного уравнения Фоккера-Планка, учитывающего инжекцию, торможение быстрых ионов на электронах, торможение и угловое рассеяние на ионах мишенной плазмы, перезарядку на атомарных пучках и уход в конус потерь. Распределение ионов аппроксимируется суммой произведений экспонент и полиномов от квадратов поперечной и продольной скоростей. Такой подход позволяет при вычислении компонент тензора диэлектрической проницаемости аналитически произвести интегрирование по продольной скорости с соблюдением правила обхода Ландау.

В третьем разделе описаны используемые ВКБ-методы. Для последовательного учета поперечной неоднородности используется условие  $L \gg r_p$ , которое позволяет строить распределения полей по поперечным координатам при фиксированных продольных параметрах. В приближении

Перлштейна-Берка получено уравнение для распределения электрического поля по радиусу в аксиально-симметричной ловушке. Из требования убывания поля на большом расстоянии от оси получено дисперсионное соотношение, связывающее частоту и продольную компоненту волнового вектора возмущения с продольной координатой. Разработан метод, позволяющий для заданного ВКБ-решения по продольной координате учесть поперечную неоднородность с помощью поправки Перлштейна-Берка, усредненной по ВКБ-траектории продольной задачи. Использование описанных в [3] методов построения ВКБ-решения по продольной координате позволяет численно искать распределения возмущений полей и границу устойчивости.

В четвертом разделе приводятся результаты численного поиска границы устойчивости в области параметров, охватывающей параметры центральной ячейки ГДЛ, при которых наблюдалась АИЦ неустойчивость. Также исследуется зависимость порогового  $\beta_{\perp}$  и частоты неустойчивого возмущения от параметров холодной плазмы, параметров инжекции и геометрии плазмы. Продемонстрирован сильный стабилизирующий эффект поперечной неоднородности при  $r_p \sim \rho_{\perp}$ . С точки зрения стабилизации АИЦ неустойчивости наиболее эффективными оказываются уменьшение размеров плазмы ( $L/\rho_{\perp}$  и  $r_p/\rho_{\perp}$ ), уменьшение угла инжекции и увеличение углового разброса инжекции.

В пятом разделе рассматривается поведение возмущений полей в периферийной плазме. При анализе пренебрегается продольной неоднородностью, и в области периферии используется приближение холодной плазмы. Показано, что наименьшему граничному  $\beta_{\perp}$  соответствует мода с азимутальным волновым числом  $m = -1$ , поскольку только для этой моды электрическое поле не обращается в ноль на оси, где плотность горячих ионов максимальна. Исследована асимптотика амплитуды и поляризации волны на большом расстоянии от оси. Показано, что вблизи оси и на периферии волна может вращаться в противоположные стороны, и оценены условия смены направления вращения.

**В третьей главе** разрабатывается модель нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости в ловушке с атомарной инжекцией. Рассматриваются условия равновесия однородной плазмы и волны конечной амплитуды с круговой поляризацией.

В первом разделе рассматриваются точные спирально-симметричные решения уравнений Власова-Максвелла. Под спиральной симметрией понимается существование такого постоянного вектора  $\vec{k}$  и постоянной  $\omega$ , что поля и функции распределения частиц не изменяются при одновременном сдвиге в пространстве и по времени на произвольные вектор  $\delta\vec{r}$

и интервал  $\delta t$ , и повороте вокруг  $\vec{k}$  на угол  $\vec{k} \cdot \delta \vec{r} - \omega \delta t$ . Движение частиц в спирально-симметричных электромагнитных полях рассматривалось во многих работах, где показано, что оно полностью интегрируемо, при этом гамильтониан может быть приведен к виду второго фундаментального гамильтониана [6]. В первом разделе показано, что уравнению Власова и требованию спиральной симметрии удовлетворяет произвольная функция двух интегралов движения – энергии частицы в системе отсчета волны и комбинации  $2\Omega k^2 \vec{v} \cdot \vec{B} / (\vec{k} \cdot \vec{B}) + (\omega - \vec{k} \cdot \vec{v})^2$ , где  $\vec{B}$  есть магнитное поле, а  $\Omega$  – циклотронная частота частицы. Подстановка функций распределения частиц в уравнения Максвелла приводит к замыкающим соотношениям, связывающим параметры волны в системе отсчета, где суммарный импульс частиц плазмы равен нулю, со средними от функций распределения.

Учет факторов, слабо нарушающих спиральную симметрию, позволяет определить конкретное заселение поверхностей постоянных интегралов движения. Во втором разделе рассматривается спирально-симметричная волна в однородной плазме с инжекцией атомарных пучков. Для поиска стационарной функции распределения ионов используется уравнение Фоккера-Планка, учитывающее движение ионов в поле волны, их торможение на электронах, перезарядку на атомарных пучках и уход в конус потерь. В предположении малости обратных времен торможения и перезарядки получено уравнение, описывающее заселение ионами поверхностей постоянных интегралов движения. Приведены результаты численного решения уравнения и параметры волны, полученные при подстановке численного решения в замыкающие соотношения. В пределе малой амплитуды волны и малого углового разброса инжекции найдено аналитическое решение кинетического уравнения и получены выражения, связывающие параметры волны с параметрами инжекции и мишенной плазмы.

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получено интегральное уравнение, описывающее пространственное распределение возмущений полей в ловушке с сильно анизотропной би-максвелловской плазмой. Создан численный код для его решения. Построена зависимость порогового  $\beta_{\perp}$  и частоты возмущения на границе АИЦ неустойчивости от плотности холодных ионов и анизотропии при параметрах близких к параметрам компактного пробкотрона ГДЛ. В пределе бесконечно большой анизотропии

найден аналитическое решение интегрального уравнения. Получен новый скейлинг границы устойчивости, который предсказывает большую устойчивость по сравнению с традиционными скейлингами. Повышенная устойчивость связана с ограничением длины волны возмущения размером анизотропной плазмы.

2. Показано, что в ловушке с наклонной инжекцией быстрых ионов интегральная инверсная заселенность траекторий ионов, необходимая для развития АИЦ неустойчивости, возникает только на траекториях ионов, имеющих энергию близкую к энергии инжекции. Получены оценки частоты и волнового вектора неустойчивого возмущения. Разработан метод аппроксимации функции распределения ионов, найденной из решения приближенного уравнения Фоккера-Планка, позволяющий выразить тензор диэлектрической проницаемости через аналитические по пространственным координатам и параметрам волны функции. Получено дисперсионное уравнение, учитывающее сохранение поперечных адиабатических инвариантов при изменении продольных координаты и волнового вектора. Разработан метод учета влияния поперечной неоднородности на границу устойчивости, основанный на усреднении поперечной оценки Перлштейна-Берка по продольной траектории движения волнового пакета. Создан численный код для поиска границы устойчивости и распределений возмущений полей в рамках ВКБ-приближения в плазме с наклонной инжекцией быстрых нейтральных атомов и существенной поперечной неоднородностью. Исследована зависимость границы устойчивости и частоты возмущения от параметров инжекции, мишенной плазмы и магнитного поля в широкой области параметров, охватывающей параметры центральной ячейки ГДЛ.
3. Описан класс точных спирально-симметричных решений бесстолкновительной системы уравнений Власова-Максвелла и предложена новая модель для описания нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости. Получено уравнение, позволяющее рассмотреть влияние нелинейной АИЦ волны произвольной амплитуды на функцию распределения ионов в открытой ловушке с инжекцией быстрых атомов в холодную мишенную плазму. Создан численный код для поиска параметров нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости при произвольных параметрах инжекции и мишенной плазмы. В пределе волны малой амплитуды найдено аналитическое решение уравнения и получены аналитические выражения, связывающие частоту и амплитуду АИЦ волны с параметрами инжекции и мишенной плазмы.

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

1. Ю.А. Цидулко, И.С. Черноштанов. Нелинейная стадия альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости. // Вестник НГУ. Серия: Физика. - 2010. - Т. 5(3). - С. 90-94.
2. I.S. Chernoshtanov, Yu.A. Tsidulko. Alfvén Ion-Cyclotron Instability in a Mirror Trap with Highly Anisotropic Plasma. // Fusion Science and Technology. - 2011. - V. 59 (1T). - P. 116-119.
3. A.V. Anikeev, P.A. Bagryansky, I.S. Chernoshtanov, M.S. Korzhavina, V.V. Prikhodko, Yu.A. Tsidulko. Study of Microinstabilities in Anisotropic Plasmoid of Thermonuclear Ions. // Fusion Science and Technology. - 2011. - V. 59(1T). - P. 104-107.
4. I.S. Chernoshtanov, Yu.A. Tsidulko. Alfvén Ion-Cyclotron Instability in a Mirror Trap with Skew Injection of Neutral Beams. // Fusion Science and Technology. - 2013. - V. 63(1T). - P. 319-321.
5. Ю.А. Цидулко, И.С. Черноштанов. Альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость в аксиально-симметричной ловушке с наклонной инжекцией быстрых атомов. // Физика плазмы. - 2014. - Т. 40, № 12. - С. 1074-1083.

## Список литературы

- [1] Р.З. Сагдеев, В.Д. Шафранов. О неустойчивости плазмы с анизотропным распределением в магнитном поле // ЖЭТФ. 1960. т. 39, вып. 1(7). с. 181-184.
- [2] R.C. Davidson, J.M. Ogden. Electromagnetic ion-cyclotron instability driven by ion energy anisotropy in high-beta plasmas // Phys. Fluids. 1975. V. 18. P. 1045-1050.
- [3] D.C. Watson. Alfvén ion-cyclotron instability in mirror machines // Phys. Fluids. 1980. V 23(12). P. 2485-2492.
- [4] G.R. Smith. Alfvén ion-cyclotron instability in tandem-mirror plasmas. I // Phys. Fluids. 1984. V. 27(6). P. 1499-1513.
- [5] G.R.Smith, W.M.Nevins, W.M.Sharp. Alfvén ion-cyclotron instability in tandem-mirror plasmas.II. // Phys. Fluids.-1984, V.27(8). - P.2120-2128.
- [6] Д.А. Панов, А.В. Тимофеев. О селективном нагреве ионов многоиотопной плазмы неоднородным ВЧ-полем. // Физика плазмы. - 1995. - Т. 21, № 12. - С. 1092-1098.
- [7] А.Н. Ляхов, В.И. Хвезюк. Об условиях стабилизации микронеустойчивостей в ловушке ГАММА-10. // Письма в ЖТФ. - 1996. - Т. 22, вып. 20. - С. 15-18.

ЧЕРНОШТАНОВ Иван Сергеевич

**Альфеновская ионно-циклотронная  
неустойчивость в открытых ловушках  
с инъекцией пучков быстрых атомов**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

---

Подписано в печать 26.03.2015 г.

Сдано в набор 27.03.2015 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 0.8 печ.л., 0.6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 2

---

Обработано на РС и отпечатано на

ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН

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