

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации ЧЕРНОШТАНОВА Ивана Сергеевича “Альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость в открытых ловушках с инжекцией пучков быстрых атомов”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 “Физика плазмы”.

### Актуальность

Микронеустойчивости плазмы в магнитном поле, в частности, альфвеновская ионно-циклотронная (АИЦ) неустойчивость, важны как для интерпретации экспериментов по удержанию термоядерной плазмы, так и в астрофизических приложениях. Развитие АИЦ неустойчивости может существенно изменить коэффициенты переноса и увеличить потери в ловушке. Результаты диссертации важны для интерпретации экспериментального наблюдения АИЦ неустойчивости в открытых ловушках с атомарной инжекцией, могут использоваться при проектировании открытых ловушек следующего поколения. Поэтому тема диссертации представляется вполне актуальной.

### Новизна

Найден новый скейлинг границы устойчивости относительно возбуждения АИЦ волн в би-максвелловской плазме. Показано, что в ловушке с наклонной инжекцией быстрых ионов неустойчивость раскачивается только ионами с энергией, близкой к энергии инжекции. Описан класс точных спирально-симметричных решений бесстолкновительного уравнения Власова и на его основе построена модель нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости. Научная новизна подтверждается 5 публикациями в журналах: *Fusion Science and Technology*, *Физика плазмы*, *Вестник НГУ*, а также докладами на отечественных и международных конференциях.

### Достоверность

Каждая глава начинается с простейших оценок и заканчивается сравнением теории с численным расчетом и экспериментом. Совпадение свидетельствует о *достоверности* полученных выводов. Достоверность подтверждается также согласием с результатами других авторов в известных предельных случаях.

## Содержание

Диссертация состоит из Введения, 3 глав и Приложения, содержит 88 страниц текста и 41 ссылку на литературу. Во Введении описана роль АИЦ неустойчивости в системах с магнитным удержанием плазмы, влияние анизотропии функции распределения ионов по скоростям и неоднородности параметров плазмы. Коротко описана также нелинейная стадия неустойчивости. Приведен список защищаемых положений.

Глава 1 содержит расчет линейного порога неустойчивости в сильно анизотропной би-максвелловской неоднородной плазме. Для решения задачи развита теория возмущений уравнения Власова в канонических переменных. Выведены интегральные уравнения для собственных колебаний и найдены аналитические формулы в предельном случае бесконечно большой анизотропии. Система уравнений диагонализирована путем перехода к циркулярным компонентам электрического поля. Полученные интегральные уравнения решены численно. Демонстрируется неплохое согласие расчета в ВКБ приближении с решением интегральных уравнений при достаточно большой плотности фоновой холодной плазмы. Найденные корни согласуются также с результатами измерений на ГДЛ.

В главе 2 АИЦ неустойчивость рассматривается в ловушке с наклонной инжекцией быстрых нейтральных атомов. Неустойчивость раскачивается из-за инверсной заселенности траекторий ионов с энергией близкой к энергии инжекции. Оценки показывают, что вследствие большого масштаба продольной неоднородности в центре пробкотрона можно пользоваться локальными дисперсионными соотношениями. Функция распределения быстрых ионов получается из решения уравнения Фоккера-Планка с учетом перезарядки на пучке, торможении на электронах и рассеянии на ионах мишенной плазмы. ВКБ приближение строится методом фазовых интегралов. Найдены точки поворота, разделяющие области стоячей волны и уходящих волн. Численно исследована зависимость давления горячих ионов на границе устойчивости от параметров инжекции и мишенной плазмы. Показано, что увеличение радиуса плазмы и уменьшение углового разброса облегчает развитие неустойчивости. Исследованы асимптотики возмущений полей в области плазменного гало, и выполнено сравнение с экспериментами на различных ловушках.

В главе 3 исследуется нелинейная стадия АИЦ неустойчивости в ловушке с атомарной инжекцией. Для этого сначала с помощью теоремы Нетер находится класс спирально-симметричных решений

бесстолкновительного уравнения Власова, которые описывают альфвеновскую волну конечной амплитуды. Каноническим преобразованием гамильтониан сводится к фундаментальному типу 2 и доказывается полная интегрируемость уравнений движения. Таким образом можно найти зависимость частоты и волнового вектора от амплитуды волны. Далее исследуются условия равновесия однородной плазмы с инъекцией атомарных пучков, и альфвеновской волны конечной амплитуды. Для описания распределения ионов используется уравнение Фоккера-Планка, которое решено методом усреднения. Разработан метод численного поиска параметров альфвеновской волны при заданных параметрах инъекции и мишенной плазмы. Для случая нормальной инъекции без углового разброса найдено аналитическое решение и продемонстрировано хорошее согласие с численным расчетом.

## Замечания

По диссертации имеются следующие замечания:

1. В работе нет полноценного литературного обзора. Во Введении на стр. 5 и 7 написано «Большое число работ посвящено ...», но в списке литературы всего 41 ссылка. Следовало бы добавить во Введение обзор литературы по ионным циклотронным колебаниям, описав историю их открытия, роль в астрофизике, в СВЧ нагреве термоядерной плазмы и т.п.
2. В главу 3, посвященной нелинейной теории АИЦ колебаний, стоило бы включить исследование на устойчивость. Расчет наиболее неустойчивой моды исключил бы неопределенность при выборе волнового вектора.
3. В кинетическом уравнении (46) учитывается динамическая сила трения, но нет диффузии ионов по углу. Обычно диффузию в пространстве скоростей учитывают в рамках уравнения Фоккера-Планка. К сожалению, в диссертации нет оценок, обосновывающих пренебрежение диффузией.
4. В формулах имеются опечатки, например, неправильно обозначена переменная интегрирования в уравнении (16) и котангенс на стр. 30. Впрочем, опечаток в работе немного.

Эти замечания носят частный характер, относятся скорее к отбору материала и оформлению, а не к содержанию диссертации, и поэтому не влияют на общую положительную оценку работы.

## Выводы

Оценивая работу в целом, можно сделать вывод, что диссертационная работа И.С. Черноштанова представляет собой научно-квалификационную работу, в которой выполнены исследования по АИЦ неустойчивости в открытой ловушке с инъекцией атомарных пучков и, таким образом, в соответствии с п. 9 Положения, решена важная для развития открытых ловушек задача. Работа написана ясным языком и на высоком научном уровне. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах и докладывались на научных конференциях. Автореферат правильно отражает основные идеи и выводы диссертации.

Учитывая актуальность темы, научную новизну результатов и достоверность выводов, можно заключить, что работа И.С. Черноштанова определенно удовлетворяет всем требованиям ВАК, а автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Доктор физ.-мат.наук, профессор  Д.А. Шапиро

Заведующий лабораторией фотоники  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института автоматики и  
электрометрии Сибирского отделения РАН

Проспект академика Коптюга, д. 1,  
630090, Новосибирск, ИАиЭ СО РАН  
тел. 33309021, e-mail: shapiro@iae.nsk.su

Подпись д.ф.-м.н., профессора Д.А. Шапиро *заверяю*:

Ученый секретарь ИАиЭ СО РАН

д.т.н.



 — С.В. Михляев