



УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

ФТИ-МН

С.В. Лебедев

«19» мая 2015г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)**

на диссертацию 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

Диссертация Черноштанова И.С. посвящена изучению условий возникновения и стадии нелинейного насыщения альфвеновской ионно-циклотронной (АИЦ) неустойчивости в открытых ловушках, в которых для создания и нагрева плазмы используется атомарная инжекция. Нагрев с помощью инжекции атомарных пучков широко применяется в плазменных экспериментах. Такой способ нагрева приводит к формированию популяции горячих ионов с функцией распределения, существенно отличающейся от максвелловского, что создает благоприятные условия для развития кинетических неустойчивостей. Одна из кинетических неустойчивостей, альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость, наблюдалась в ряде экспериментов на открытых и тороидальных ловушках. Ее развитие приводит к генерации электромагнитных волн в плазме, которые усиливают рассеяние ионов и могут приводить к аномально высоким потерям частиц и энергии из ловушки. Тема диссертационной работы Черноштанова И.С. представляется актуальной для развития открытых ловушек как возможных систем для управляемого термоядерного синтеза или термоядерного источника нейтронов.

Диссертация состоит из введения, трех глав и четырех приложений.

Во введении дается краткий обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному изучению АИЦ неустойчивости в открытых ловушках, и обсуждаются методы теоретического изучения АИЦ неустойчивости. Также во введении формулируются цели диссертации и положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена исследованию линейной стадии АИЦ неустойчивости в пробкотроне с популяцией горячих ионов, имеющих большое отношение поперечного давления к продольному (анизотропию). Сильно анизотропная плазма может возникать, например, при инжекции атомарных пучков поперек магнитного поля ловушки. Показано, что в рассматриваемой задаче отклик плазмы на внешнее электрическое поле становится существенно нелокальным, что приводит к необходимости использования интегрального уравнения для описания эволюции малых возмущений. Выведено интегральное уравнение для возмущений в сильно анизотропной плазме. С помощью численного решения интегрального уравнения найдены распределения возмущений полей и показано, что давление горячих ионов на границе АИЦ

неустойчивости падает с ростом анизотропии и немонотонно зависит от плотности мишенной плазмы. Также в первой главе найден скейлинг границы АИЦ неустойчивости, справедливый в пределе бесконечно большой анизотропии. Результаты первой главы сравниваются с экспериментальными данными по наблюдению АИЦ неустойчивости в компактном пробкотроне ГДЛ.

Во второй главе исследуется линейная стадия АИЦ неустойчивости в пробкотроне с теплой мишенной плазмой, в которую производится мощная наклонная атомарная инжекция. Такая конфигурация соответствует, например, центральной ячейке установки ГДЛ, или проекту источника нейтронов на основе открытой ловушки. В качестве невозмущенной функции распределения горячих ионов используется решение уравнения Фоккера-Планка, учитывающего инжекцию, перезарядку быстрых ионов на атомарных пучках, их торможение на электронах и рассеяние на ионах мишенной плазмы. Для последовательного учета поперечной неоднородности используется предположение о малости поперечных размеров плазмы по сравнению с продольными. Приведены примеры продольных распределений неустойчивых полей, численно исследована зависимость порогового давления плазмы от параметров мишенной плазмы и инжекции, и размеров ловушки. Выделены факторы, способствующие стабилизации АИЦ неустойчивости в данной системе. Особо отмечен сильный стабилизирующий эффект от поперечной неоднородности в случае, когда радиус плазмы сравним с ларморовским радиусом ионов. Также во второй главе исследуется поведение возмущений полей в области периферийной плазмы в аксиально-симметричной ловушке. Найден азимутальный номер самой неустойчивой моды и показано, что возмущение электрического поля в периферийной плазме может вращаться в сторону ларморовского вращения электронов (в отличие от приосевой области, где возмущение вращается в ионную сторону). Эти результаты важны для интерпретации измерений характеристик неустойчивого возмущения, которые, как правило, производятся вне области горячей плазмы.

Изучение влияния АИЦ неустойчивости на удержание частиц и энергии в открытых ловушках требует привлечения нелинейных моделей. В третьей главе предложен новый подход к описанию состояния нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости, основанный точных спирально-симметричных решениях бесстолкновительных уравнений Власова-Максвелла. В первой части рассмотрена монохроматическая волна с круговой поляризацией, бегущая в однородной плазме вдоль однородного магнитного поля. Построены решения уравнения Власова и найдены условия, при которых создаваемые частицами плазмы токи индуцируют те же спирально-симметричные поля, которые использовались при построении функций распределения. Во второй части найденные точные решения используются в задаче об определении условий равновесия волны конечной амплитуды с круговой поляризацией и однородной замагниченной плазмы с инжекцией пучков нейтральных атомов. Факторы, нарушающие спиральную симметрию (инжекция, перезарядка и торможение на электронах), предполагаются малыми. Для поиска функции распределения горячих ионов используется уравнение Фоккера-Планка, усредненное по траекториям частиц в волне. Высокая симметрия задачи позволяет продвинуться достаточно далеко, в частности, найти аналитические выражения, которые связывают параметры волны с мощностью инжекции и энергией инжектируемых частиц в случае нулевого углового разброса инжекции и волны малой, но конечной амплитуды. Также, с помощью численного решения уравнения Фоккера-Планка исследованы зависимости параметров волны в случае инжекции с конечным угловым разбросом.

В приложения вынесены громоздкие вычисления и описание численной схемы решения интегрального уравнения.

Научная и практическая значимость работы заключается в разработке методов анализа условий возникновения и параметров нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости в открытых ловушках с мощной атомарной инжекцией. Полученные результаты имеют значение для дальнейших исследований по программе управляемого термоядерного синтеза, поскольку открытая ловушка с инжекцией атомарных пучков в мишенную плазму – потенциальный кандидат на роль источника термоядерных нейтронов. Создание источника невозможно без моделей, позволяющих предсказывать условия возникновения кинетических неустойчивостей. Созданные в диссертации модели позволяют выполнить расчеты границы АИЦ неустойчивости при учете геометрии системы, параметров мишенной плазмы и инжекции.

Результаты диссертации могут быть использованы при планировании и интерпретации экспериментов на существующих открытых ловушках с атомарной инжекцией, и при проектировании открытых ловушек следующего поколения. Результаты диссертации могут быть использованы в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, НИЦ «Курчатовский институт».

При обсуждении диссертации были высказаны следующие замечания:


- 1) В первой главе уместно уточнить по какому параметру находится асимптотический критерий устойчивости АЦН.
- 2) Во второй главе утверждается, что критерий адиабатичности движения ионов вдоль магнитного поля – малость характерного масштаба неоднородности поперек магнитного поля в сравнении с тем же масштабом вдоль магнитного поля. В действительности, как представляется, корректным критерием является малость времени осцилляции поперек магнитного поля в сравнении с ним же вдоль магнитного поля.
- 3) Во второй главе, параграфе 2.5 используется приближение бесконечной проводимости вдоль магнитного поля. Однако, при описании альфвеновской волны в плазме, неоднородной поперек магнитного поля, обычно, требуется учет или конечной проводимости вдоль поля, или тепловых эффектов.

Указанные выше замечания носят частный характер, не снижая ценности диссертации, и не влияют на общую положительную оценку работы. Работа выполнена на высоком уровне, авторский вклад в решение задачи является определяющим. Результаты работы опубликованы в российских и зарубежных изданиях и докладывались на международных конференциях.

Автореферат с достаточной полнотой отражает содержание диссертации.

Считаем, что диссертационная работа Черноштанова Ивана Сергеевича “Альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость в открытых ловушках с инжекцией пучков быстрых атомов” по своему содержанию и полученным в ходе исследований результатам удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы». Автор диссертации, Черноштанов Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

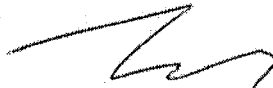
Отзыв подготовил  
с.н.с., кандидат физико-математических наук



А.Ю. Попов

Настоящий отзыв заслушан и утвержден единогласно на заседании научного семинара лаборатории высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе «15» мая 2015 г., протокол №15/05/15.

Заведующий лаборатории физики высокотемпературной плазмы  
Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН  
доктор физико-математических наук, профессор



Е.З. Гусаков

Ученый секретарь  
Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики,  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
кандидат физико-математических наук



А.М. Красильщиков