

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной
работе Национального
исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Э.Ф. Лобанович



_____ 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
на диссертацию Зайцева Константина Владимировича **«Изучение физики
удержания плазмы в ГДЛ методом магнитной диагностики»**,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Актуальность темы

Диссертация Зайцева К.В. посвящена исследованиям физики удержания плазмы на установке Газодинамическая Ловушка (ГДЛ) в режимах работы с высоким относительным давлением при помощи магнитных диагностик, а именно изучению спектральных характеристик альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости (АИЦН) и её влияния на эффективность удержания плазмы в ГДЛ, исследованию длинноволновых продольных колебаний магнитного поля в диапазоне от 90 до 100 кГц и изучению структуры нелинейно насыщенных желобковых колебаний плазменного столба ГДЛ в режиме с вихревым удержанием.

На сегодняшний день на установке ГДЛ, которая построена в ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, были получены рекордные для ловушек открытого типа значения относительного давления плазмы и температура электронов, которые позволяют весьма обоснованно рассматривать вопрос о практическом применении источника нейтронов на основе ГДЛ в ближайшие десятилетия, что и определяет актуальность исследований физических процессов, наблюдаемых в установках этого типа.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа К.В. Зайцева изложена на 83 страницах, содержит 36 иллюстраций, 47 наименований библиографии и состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во Введении К.В. Зайцев обосновывает актуальность поставленной научной задачи, демонстрирует новизну и значимость полученных в работе результатов.

В первой главе представлен обзор предшествующих теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению АИЦН. Эта неустойчивость была впервые рассмотрена на простейшей модели однородной плазмы с бимаксвелловским распределением ионов по скоростям. Дальнейшие исследования имели целью приблизить рассматриваемую модель к условиям реального эксперимента в открытых ловушках. Эта тенденция проявилась как в выборе функции распределения ионов по скоростям, так и в учете пространственной неоднородности плазмы, удерживаемой в неоднородном магнитном поле открытых ловушек. Наиболее адекватная теоретическая модель плазмы в ГДЛ была рассмотрена в работах Цидулко и др. В них был учтен основной фактор, формирующий функцию распределения быстрых ионов – замедление на электронах. Использование квазиклассического приближения при описании пространственной структуры колебаний позволило сравнительно просто учесть неоднородность плазмы и магнитного поля. Наряду с определением границ области неустойчивости в этих работах была также предложена наглядная картина, иллюстрирующая возможности раскачки колебаний при их взаимодействии с ионным распределением. С ее помощью была установлена связь характеристик неустойчивых колебаний с положением ионов, подпитывающих их энергией, на фазовой плоскости.

Впервые АИЦН была зарегистрирована в концевых пробкотронах амбиполярной ловушки ТМХ, где высокоэнергичная ионная компонента создавалась посредством инжекции быстрых нейтралов. Инвариантность АИЦН по отношению к способу создания популяции быстрых ионов была продемонстрирована на установках TARA и GAMMA-10, где для этой цели использовался ИЦР нагрев. Во всех системах развитие АИЦН приводило к усилению потока плазмы через пробки открытых ловушек. ГДЛ отличается от вышеупомянутых ловушек как своим устройством, так и параметрами удерживаемой плазмы, в частности, в ней имеет место наклонная по отношению к магнитному полю инжекция быстрых нейтралов. Изучение АИЦН в этих условиях представляет несомненный интерес.

Вторая глава содержит описание установки ГДЛ и основных диагностик, использовавшихся для получения экспериментальных данных. Альфвеновские колебания, раскачивающиеся при АИЦН, непотенциальны, поэтому данная неустойчивость может быть исследована с помощью магнитных зондов. Электрические токи и возбуждаемые ими переменные

магнитные поля неизбежно возникают при любых колебаниях плазмы, поэтому низкочастотные магнитные зонды использовались также при изучении звуковых и желобковых колебаний. Такие зонды представляют собой многовитковые катушки, ориентированные таким образом, чтобы фиксировать переменные радиальные магнитные поля. Они были сгруппированы в продольную и круговую сборки, что позволяло определить как продольную, так и азимутальную структуру колебаний. Для регистрации АИЦН, имеющей существенно большую частоту, использовались сборки высокочастотных зондов. Каждый такой зонд состоял из трех взаимно ортогональных витков, что позволяло определить поляризацию колебаний. Вариации основного магнитного поля, вызванные присутствием плазмы конечного давления, определялись по излучению быстрых нейтронов (MSE – диагностика).

В третьей главе приведены результаты исследования высокочастотной АИЦН. Обнаружена временная связь развития неустойчивости со спадом диамагнитного сигнала в области остановки плещущихся ионов.

Открытые ловушки подвержены как АИЦН, так и дрейфово-конусной неустойчивости, которые различаются пространственной структурой. При дрейфово-конусной неустойчивости раскачиваются волны, азимутальные длины которых малы по сравнению со средним ларморовским радиусом ионов, в то время как АИЦН является более крупномасштабной. Данные, полученные с круговой сборки, показывают, что в ГДЛ возбуждаются колебания, с азимутальными волновыми числами $m=1,2$, что позволяет исключить дрейфово-конусную неустойчивость из числа возможных кандидатов. По данным, полученным с помощью линейной сборки, определено продольное волновое неустойчивых колебаний. Оно соответствует условию циклотронного резонанса с быстрыми ионами, найденному Цидулко и др. Совокупность экспериментальных данных, представленных в 3 главе, позволяет утверждать, что в ГДЛ развивалась АИЦН. Ее раскачка не приводит к заметным изменениям параметров плазмы, а данные, полученные при помощи сцинтилляционного датчика, показывают, что при этом выход продуктов D-D реакции уменьшается на величину не более 5%.

АИЦН меняет вид функции распределения высокоэнергичных ионов, что сказывается на продольном распределении давления плазмы и определяемым им магнитном поле. Для интерпретации измерений радиального магнитного поля в функции от расстояния вдоль оси ловушки в 3 главе и Приложении рассмотрена упрощенная модель плазмы, в которой считается, что центры ларморовских окружностей высокоэнергичных ионов лежат на оси системы, учитывается их торможение на электронах и перезарядка на нейтральных атомах. Принято, что АИЦН приводит лишь к развороту вектора скорости ионов. Подбором лишь одного подгоночного параметра – угловой ширины распределения удалось добиться хорошего

совпадения расчетной и экспериментальной зависимостей радиального магнитного поля от продольной координаты.

Четвёртая глава содержит результаты исследования длинноволновых колебаний радиального магнитного поля в частотном диапазоне от 90 до 100 кГц. Эти колебания были обнаружены при анализе АИЦН. Их частота не изменялась в ходе эксперимента и не покидала обозначенного выше узкого диапазона. При этом глобальные параметры плазмы, например, температура и диамагнетизм, изменялись в несколько раз. С помощью круговой сборки низкочастотных магнитных зондов было установлено, что колебания азимутально-симметричны ($m=0$). Данные с линейной сборки и с одиночных зондов показывают, что в продольном направлении исследуемые колебания соответствуют основной моде колебательной системы со свободными концами. Все эти результаты согласуются с проведенным ранее теоретическим анализом звуковых колебаний в ГДЛ.

В пятой главе описан нелинейный режим развития желобковой неустойчивости в неоднородном радиальном электрическом поле, который назван «вихревым удержанием». С помощью низкочастотных магнитных зондов установлено, что колебания вытянуты вдоль магнитного поля — являются желобковыми, а их азимутальное волновое число при развитии неустойчивости меняется от $m=1$ до $m=2$. Эти результаты, а также изменение частоты вращения плазменного столба при переходе от одной доминирующей моды к другой согласуется с теоретическими представлениями.

В Заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Новизна результатов исследований

Впервые в ловушке открытого типа, в которой в качестве основной системы нагрева плазмы используется наклонная атомарная инжекция, изучены спектральные характеристики АИЦН и рассмотрено её влияние на эффективность удержания плазмы. Впервые в ГДЛ были изучены спектральные характеристики нелинейно насыщенных желобковых колебаний плазмы, возникающие в режиме «вихревого удержания». Обнаружена новая мода колебаний — длинноволновые продольные колебания магнитного поля в диапазоне от 90 до 100 кГц.

Практическая и научная ценность диссертации

Результаты исследования АИЦН в ГДЛ, проведенные в диссертации, являются фундаментальными для подобных ловушек. Подтверждена теоретическая картина развития неустойчивости и её влияния на рассеяние частиц плазмы в открытых ловушках с наклонной инжекцией. В диссертации сделан вывод о том, что развитие АИЦН не приводит к ухудшению удержания плазмы в ГДЛ и, по сути, никаких специальных мер по стабилизации этой неустойчивости в промышленном нейтронном источнике на её основе при сохранении текущих параметров принимать не нужно.

Достоверность результатов исследований и личный вклад автора

Достоверность полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Экспериментальные результаты получены в результате многократно проведённых исследований и, где это было возможно, косвенно подтверждены экспериментальными данными со смежных диагностик. Также достоверность подтверждается апробацией и публикацией в высокорейтинговых периодических научных изданиях.

Личный вклад автора в получение научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автором были разработаны системы магнитной диагностики на установке ГДЛ, создано программное обеспечение для обработки получаемых экспериментальных данных и проведён их анализ.

Замечания:

1. В диссертации как АИЦН, так и другие неустойчивости, наблюдавшиеся на установке ГДЛ, исследуются с помощью магнитных зондов. Такой выбор естествен для АИЦН, которая представляет собой раскачку непотенциальных альфвеновских колебаний, но требует обсуждения в случае звуковых и желобковых колебаний, которые обычно считаются потенциальными.

2. В диссертации подробно освещена история исследования АИЦН и современное состояние проблемы, в то время как обзор работ по звуковым и желобковым колебаниям отсутствует. Между тем проблема стабилизации желобковой неустойчивости неоднородным вращением плазмы имеет давнюю историю, см. пионерские работы на установке ОГРА-1 в ИАЭ им. Курчатова, на английской установке ALICE, на установках ПСП в Новосибирске. Возможны также различные подходы к теории явления.

3. На стр. 70 без пояснений используется жаргонный термин «амбиполярное вращение». На мой взгляд, жаргонным является и выражение «вихревое удержание».

Общее заключение

Тема и содержание диссертации К.В. Зайцева соответствуют паспорту специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Он даёт достаточно полное представление о содержании диссертации, содержит необходимые формулировки целей исследования, выносимых на защиту положений, научной новизны и практической значимости. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа К. В. Зайцева на соискание степени кандидата физико-математических наук отвечает требованиям «Положения о присуждении учёных степеней и, в частности, пункту 9 Положения», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена задача, имеющая существенное значение для

физики плазмы в открытых ловушках, а именно, определена степень влияния АИЦ неустойчивости на удержание плазмы в установке с наклонной атомарной инжекцией. Автор, Зайцев Константин Владимирович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв подготовлен по результатам обсуждения в Отделении плазменных технологий Курчатовского комплекса физико-химических технологий, протокол № 686 от 1 декабря 2016г.

Отзыв подготовил:

Тимофеев Александр Владимирович,
доктор физ.-мат. наук, проф., г. н. с. ККФХТ,
01-04-08, физика плазмы
123182, Москва. пл. Курчатова, д.1,
тел. 84991969905, e-mail: Timofeev_AV@nrcki.ru

Тимофеев А.В

Заместитель руководителя Отделения плазменных технологий Курчатовского комплекса физико-химических технологий

Кулыгин В.М.