

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации ЗАЙЦЕВА Константина Владимировича «Изучение физики удержания плазмы в ГДЛ методом магнитной диагностики», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы»

Актуальность

Одной из главных проблем на пути к управляемому термоядерному реактору является недостаточное представление об изменении структуры различных материалов под действием интенсивного пучка нейтронов. Для систематического изучения поведения вещества под нейтронным потоком порядка нескольких мегаватт на квадратный метр необходимо создать генератор нейтронов подходящей мощности. Предложенная в 1980-х годах в Институте ядерной физики схема источника нейтронов на основе газодинамической ловушки (ГДЛ), в которую в дейтериевую плазму под малым углом к оси инжектируются ионы трития, нуждается в дальнейшем глубоком экспериментальном и теоретическом исследовании. Поэтому *актуальность* темы не вызывает сомнений.

Новизна

Спектры альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости измерены в ловушке с наклонной инжекцией. Обнаружена глобальная звуковая мода колебаний на частоте 90–100 кГц. Впервые на ГДЛ исследован спектр нелинейно-насыщенных желобковых колебаний плазмы в режиме вихревого удержания.

Научная *новизна* подтверждается 5 статьями в журналах *Fusion Science and Technology*, *Phys. Plasmas*, *Physica Scripta*, *Физика плазмы*, а также докладами на отечественных и международных конференциях.

Достоверность

Достоверность полученных данных основана в первую очередь на современной комплексной системе диагностики колебаний электрического и магнитного поля, применяемой на установке ГДЛ. Для регистрации низкочастотных и высокочастотных колебаний используются отдельные сборки линейных и круговых зондов. Система дополнена диагностикой радиального магнитного поля на основе динамического Штарк-эффекта. Достоверность основных результатов подтверждается согласием с теоретическими предсказаниями. Результаты измерений согласуются также с закономерностями, наблюдавшимися ранее на установках Gamma-10, ТМХ, Тара.

Содержание

Диссертация состоит из Введения, 5 глав и Заключения, содержит 83 страницы текста, 36 рисунков и 47 ссылок на литературу.

Введение напоминает об истории термоядерных исследований в СССР, начатых в 1950 г. После работ Сахарова — Тамма и Будкера — Поста экспериментальные установки расщепились на две ветви: ловушки с замкнутыми (ТОКАМАК) или открытыми (пробкотрон) силовыми линиями магнитного поля. Подробно обсуждаются преимущества и недостатки той и другой топологии полей. Приводится идея газодинамической ловушки (ГДЛ), предложенной Мирновым и Рютовым, которая потенциально позволяет создать генератор нейтронов мощностью несколько мегаватт на квадратный метр. Приведено описание самых опасных неустойчивостей в ГДЛ и перечислены главы диссертационной работы.

Глава 1 посвящена обзору современного состояния науки в области альфвеновской ионно-циклотронной (АИЦ) неустойчивости в лабораторной плазме и магнитосфере Земли. Подробно обсуждается теория АИЦ колебаний, начиная с работ Розенблюта и Сагдеева — Шафранова по двухтемпературной (бимаксвелловской) плазме 1960 г. и заканчивая недавними результатами Цидулко — Черноштанова о стабилизации неустойчивости в открытых ловушках с наклонной инжекцией

нейтральных атомов. Подробно и критически проанализированы экспериментальные результаты, полученные на установках Tora, ТМХ, Gamma-10, ГДЛ. Указан пробел в исследованиях: отсутствие экспериментальных данных по ловушкам с наклонной инжекцией. Обзор написан понятно и подробно, поэтому его можно рекомендовать студентам и аспирантам для быстрого вхождения в курс дел по физике волн в плазме ГДЛ.

В главе 2 описана 7-метровая экспериментальная установка ГДЛ ИЯФ с магнитным полем 3.5 кГс и пробочным отношением $R = 35$, в которой выполнялись эксперименты по наклонной инжекции дейтерия в плазму. Всего на пяти страницах приведены схема установки, параметры плазмы и пучка, описание периферийной инжекции холодного атомарного водорода в ловушку, метод подавления МГД неустойчивостей с помощью вихревого удержания. Там же изложена схема сборки для измерения флуктуаций электрического и магнитного поля в разных точках плазмы, отдельно на низких и высоких частотах. Объясняется также принцип работы дополнительной спектральной диагностики на динамическом эффекте Штарка.

В главе 3 изучается АИЦ в ГДЛ. В эксперименте обнаружены сигналы на частоте 1.15 МГц. Идентификация неустойчивости производилась по трем признакам: возбуждалась азимутальная мода $m = 1$, направление вращения волны менялось с ионного на электронное на расстоянии 8 см от оси и диапазон резонансных продольных скоростей частиц совпал с предсказаниями теории. В разделе 3.2 исследуется влияние раскачки альфвеновской волны на эффективность удержания дейтериевой плазмы. Показано, что выход продуктов D-D реакции уменьшается не более, чем на 5% (рис. 26). В разделе 3.3 показано, что радиальное магнитное поле уменьшается в момент возбуждения волн на 10%. Уширения радиального профиля магнитного поля объясняется рассеянием резонансных частиц при возбуждении АИЦ.

Глава 4 содержит анализ результатов по низкочастотным колебаниям. При изучении аксиально симметричной моды $m = 0$ выявлены колебания на частоте 90–100 кГц. Обнаружено, что на протяжении линейной сборки 1.8 м возмущение давления не меняет фазы. От-

сюда делается вывод, что возбуждается стоячая волна, что отвечает глобальным звуковым колебаниям. В главе 5 исследуется вращение плазменного столба в режиме вихревого удержания. К плазме прикладывается радиальное электрическое поле, приводящее к азимутальному дрейфу в скрещенных полях. Такой режим используется для стабилизации МГД неустойчивостей. Поведение наблюдаемых в эксперименте мод на частоте 40 и 20 кГц ($m = 1, 2$) согласуется с теоретическими предсказаниями, откуда следует, что наблюдается нелинейно насыщенная желобковая неустойчивость. В Заключении кратко перечислены основные результаты работы.

Замечания

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Глава 2 слишком короткая. В эту главу наряду с описанием установки следовало бы включить графики тестовых испытаний, показывающие высокую точность, чувствительность, разрешение зондовой диагностики электромагнитных полей в плазме, и сравнение достигнутых параметров с известными из литературы. Это был бы еще один аргумент в пользу достоверности и надежности обсуждаемых в последующих главах экспериментальных данных.
2. В конце автореферата имеется два списка: статьи автора по теме диссертации и публикации, использованные в работе. Ссылки [2] из первого списка и [1,10] из второго тождественно совпадают, так что одна работа процитирована трижды: В последнем абзаце стр. 70 диссертации пропущено слово.

Приведенные замечания носят частный характер, относятся скорее к отбору материала и оформлению рукописи, 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 К.В. Зайцева представляет собой научно-квалификационную работу, в которой экспериментально исследованы основные неустойчивости в ГДЛ ИЯФ и показано, что они несущественно влияют на основные параметры плазмы. Работа написана ясным языком и на высоком научном уровне. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах и известны специалистам. Автореферат правильно отражает основные идеи и выводы диссертации.

Учитывая актуальность темы, научную новизну результатов и достоверность выводов, можно заключить, что работа К.В. Зайцева определенно удовлетворяет всем требованиям п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а автор заслуживает присуждения ему 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 автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН

Проспект академика Коптюга, д. 1, 630090, Новосибирск, ИАиЭ СО РАН, тел. 3309021, e-mail: shapiro@iae.nsk.su

Подпись д.ф.-м.н. Д.А.Шапиро заверяю:

Ученый секретарь ИАиЭ СО РАН

Д.Т.Н.



С.В. Михляев