

1552421

На правах рукописи

Ляхов Андрей Николаевич

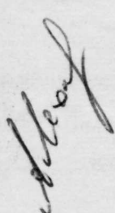
АНАЛИЗ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ПЛАЗМЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СЕКЦИИ
АМБИПОЛЯРНОГО РЕАКТОРА

01.04.14. - теплофизика и молекулярная физика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

 Москва-1996

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ХВЕСЮК В.И.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук РУХАДЗЕ А.А.
доктор технических наук ЛАТЫШЕВ Л.А.

Ведущая организация Институт Ядерной Физики им. Г.И.Будкера СОРАН.

Защита состоится 16-го декабря 1996 года в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного совета К.053.15.08 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул. д.5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ

Автореферат разослан "28" октября 1996 года

/ Ученый секретарь специализированного совета

кандидат технических наук КУТУКОВ Ю.Н.

Подписано к печати 16.8.96. Объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана. Заказ 291

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

НА ДСМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Актуальность темы.

Истощение запасов минерального топлива и загрязнение окружающей среды ставят вопрос о разработке новых источников энергии. Одним из наиболее продвинутых направлений является управляемый термоядерный синтез (УТС).

Целесообразность создания термоядерных реакторов не очевидна. Дело в том, что они значимо проигрывают ядерным из-за относительно низкой удельной мощности производства энергии и большой технологической сложности. Одним из главных факторов, обеспечивающих преимущество термоядерной энергетике может стать существенно более низкая радиоактивность энергетической установки в целом. Однако использование D-T топлива не решает задачу, так как 80% производимой энергии уносится с быстрыми нейтронами, что ведет, во-первых, к очень высокой наведенной радиоактивности, и, во-вторых, неприемлемо низкому ресурсу первой стенки реактора.

1552421
Требование экологической чистоты источника энергии ограничивает спектр возможных термоядерных реакций. Единственно возможной оказывается реакция синтеза $D + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + p + 18.3 \text{ МэВ}$. Эта реакция является безнейтронной, не содержит радиоактивных компонент и ее применение значительно снижает как требования к защите, так и наведенную радиоактивность конструкционных материалов и увеличивает ресурс первой стенки до предъявляемых к энергетической установке значений.

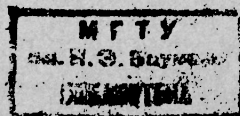
Ранее было показано, что из всех реально разработанных к настоящему времени систем магнитного удержания плазмы, для D-3He синтеза наиболее предпочтительной является амбиполярная открытая ловушка. К настоящему времени в экспериментах на открытых системах достигнуты результаты,

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1552421

Пяхов А.Н. Анализ низкочас



примерно соответствующие полученным на токамаках 10 лет назад.

К настоящему времени показано, что при учете классических кулоновских процессов рассеяния в $D-^3He$ плазме возможно достижение (при выполнении ряда условий) высоких значений удельного производства энергии. Дальнейшее развитие работ связано с необходимостью анализа устойчивости плазмы и разработке методов подавления неустойчивостей.

Данная задача имеет два аспекта. Во-первых, это анализ экспериментальной ситуации на амбиполярной открытой ловушке второго поколения GAMMA-10 (Япония), и анализ наиболее опасных низкочастотных электромагнитных неустойчивостей (Альфеновской и магнитозвуковой), и поиск возможностей дальнейшего прогресса, то есть условий, обеспечивающих устойчивые режимы удержания с повышенными параметрами плазмы.

Во-вторых, это анализ термоядерных неустойчивостей и возможностей их подавления в условиях развитой реакции синтеза $D-^3He$ топлива, с целью развития концепции малорадиоактивного термоядерного амбиполярного реактора.

Из-за особенностей удержания частиц в плазме открытой ловушки (наличия конуса потерь) их функции распределения являются анизотропными. Так как это является одним из качеств системы удержания, то и в данной работе основное внимание сосредоточено на кинетических микроустойчивостях, вызванных анизотропией функций распределения : альфеновской и магнитозвуковой.

Цель работы.

1. Разработка физико-математической модели низкочастотных электромагнитных колебаний однородной плазмы конечных размеров открытых систем. Создание соответствующего программного аппарата

исследований.

2. Проведение многопараметрического анализа устойчивости низкочастотных электромагнитных колебаний как для экспериментальной установки GAMMA-10 (Япония), так и для перспективного D-3He реактора. Поиск областей устойчивой работы. Выявление факторов, влияющих на диапазон устойчивых режимов.

3. Обобщение результатов и выработка рекомендаций по подавлению НЧ ЭМ неустойчивостей в эксперименте и повышению достижимых параметров плазмы.

Научная новизна работы.

1. Впервые поставлена задача определения собственных частот (инкрементов) и радиальных распределений потенциала электромагнитных неустойчивостей (альфвеновской и магнитозвуковой) в открытых цилиндрических термоядерных системах конечного радиуса с D-3He топливом.

2. Выяснено, какие именно моды и в каких диапазонах параметров будут неустойчивыми.

3. Впервые выполнен многопараметрический анализ электромагнитных НЧ мод на предмет их устойчивости в плазме центральной ячейки амбиполярного D-3He реактора.

4. Найдена возможность стабилизации альфвеновской и магнитозвуковой неустойчивостей.

5. Рассчитаны частотные спектры колебаний в эксперименте на GAMMA-10. Это имеет большое значение для тестирования используемых математической модели и расчетной схемы. Сравнение экспериментальных и расчетных данных позволило идентифицировать наблюдавшиеся в эксперименте моды. Альфвеновских колебания возбуждались из-за наличия

температурной анизотропии ионов. Обнаружено, что стабилизация этой неустойчивости в ограниченной плазме цилиндрической геометрии наступает при меньшей анизотропии температур, чем предсказывает классическая теория бесконечной плазмы. Показано, что наблюдаемое в эксперименте ограничение плотности плазмы связано с обнаруженным в расчетах резким увеличением инкрементов нарастания неустойчивостей.

Практическая ценность работы.

1. Создана система математического и программного обеспечения для численного исследования низкочастотных электромагнитных колебаний однородной плазмы конечных размеров открытых ловушек.

2. Методика позволяет проводить идентификацию неустойчивых мод в эксперименте путем сравнения экспериментальных и расчетных спектров, изучать влияние варьирования плазменных параметров и их сочетаний на устойчивость колебаний.

3. Проведенный параметрический анализ показал возможность полного подавления низкочастотных электромагнитных неустойчивостей как в эксперименте, так и в плазме D-3He реактора. В последнем случае сформулированы дополнительно к ранее известным требования, обеспечивающие устойчивость плазмы, по отношению к раскачке колебаний продуктами реакции синтеза.

4. Указана возможность повышения плотности плазмы в амбиполярной ловушке.

На защиту выносятся:

- метод исследования низкочастотных электромагнитных колебаний однородной плазмы конечных размеров в открытых термоядерных системах;
- система алгоритмов и программ для численного моделирования

указанных колебаний,

- результаты численного исследования НЧ ЭМ неустойчивостей в экспериментальной установке GAMMA-10 (Япония),
- результаты численного исследования термоядерных НЧ ЭМ неустойчивостей в плазме перспективного термоядерного реактора на D-3He.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на научных семинарах в Институте Атомной Энергии им. Курчаева, Институте Общей Физики РАН, Институте Ядерной Физики им.Будкера СОРАН, НИИЭМ МГТУ им. Баумана (1996 год), и на конференциях "Controlled Fusion and Plasma Physics, 23rd European Conference Kiev, 24-28 June 1996", ICPP-96, Nagoya, Japan, 9-13 September 1996.

Структура и объем работы.

Содержание работы отражено во введении, четырех главах, двух приложениях и в заключении. По объему работа состоит из 114 страниц текста, в том числе 38 рисунков. библиография насчитывает 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, кратко изложено содержание глав диссертации, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов.

В первой главе кратко рассмотрено состояние и перспективы развития

исследований электромагнитных неустойчивостей термоядерной плазмы реакторных параметров. Дан обзор работ, посвященных исследованию Альфвеновских неустойчивостей в разных конфигурациях, приведены основные экспериментальные результаты по наблюдению НЧ электромагнитных неустойчивостей. Указано на совпадение возникших задач о раскачке колебаний в ловушке продуктами синтеза и раскачкой неустойчивостей НЧ и ОНЧ диапазона в магнитосфере солнечным ветром.

В главе 2 описывается используемая математическая модель, описывающая нормальные моды исследуемой системы, и позволяющая определять инкременты (декременты) колебаний сепаратных мод в цилиндрической геометрии центральной секции амбиполярного реактора. Метод основан на решении волнового уравнения для плазменного цилиндра с резкой границей, находящегося в однородном магнитном поле и моделирующего центральную секцию амбиполярной ловушки. При этом учитывается ослабление поля из-за диамагнетизма плазмы: $B_0 = B_e \sqrt{1 - \beta_\perp}$, где

$$\beta_\perp = \frac{8\pi}{B_0^2} \left(\sum_i n_i T_i + n_e T_e + \sum_s p_{\perp s} \right) \quad (1)$$

Здесь i - суммирование вклада от максвелловских ионов, e - вклад от электронов, и $p_{\perp s}$ - вклад в поперечное давление от продуктов термоядерной реакции (для случая D-3He плазмы).

Волновое уравнение, $\nabla \times \nabla \times E - \frac{\omega^2}{c^2} D^{(H)} \cdot E = 0$, преобразовывалось в винтовую систему координат ($E_\pm = E_r \pm iE_\theta$), что позволяло найти решение для радиальной зависимости собственных мод в виде линейной комбинации функций Бесселя.

Функции распределения продуктов синтеза и, следовательно, $p_{\perp s}$, находились из решения упрощенного уравнения Фоккер-Планка, учитывающего рождение частиц при высоких энергиях, торможение по

скоростям и рассеяние по pitch-углу. Используемая модель является модификацией методов, предложенных Хо [Phys. Fluids.-1988.-v.31.-P.1656-1671], в сторону отказа от аналитических решений в пользу полностью численного анализа. К этой главе относятся также приложения А. и Б. Вычисление инкремента нарастания колебание велось по формуле, учитывающей конечный радиус плазмы r_p :

$$\gamma = - \frac{\int_0^{r_p} r dr E^* \cdot D^A \cdot E}{\int_0^{r_p} r dr E^* \cdot \frac{\partial D^H}{\partial \omega} \cdot E} \quad (2)$$

Здесь индексы A, H соответствуют анти-эрмитовой и эрмитовой части тензора диэлектрической проницаемости. При этом в тензоре D^A учитывалась конечная температура всех сортов частиц. Тензор D^H брался для холодной плазмы и использовался в волновом уравнении.

Принципиально важной особенностью используемой модели является одновременный учет всех элементов тензора диэлектрической проницаемости замагниченной плазмы, что во-первых, обеспечивает рассмотрение общего случая колебаний с $k_r \neq 0, k_z \neq 0$, и, во-вторых, всех возможных механизмов как раскачки так и подавления колебаний.

В третьей главе представлены результаты анализа перспективного малорадиоактивного термоядерного реактора на D-3He.

Вначале, с целью проверки достоверности модели было проведено тестирование математической модели на экспериментальных данных с установки GAMMA-10.

Расчетный спектр Альфеновской ионно-циклотронной неустойчивости, вызванной анизотропией ионной температуры ($T_{\parallel}=0.3$ кэВ, $T_{\perp}=3$ кэВ) показан на рис.1. Получено хорошее совпадение с экспериментальными данными, включая частотный диапазон неустойчивых колебаний, дискретную

структуру спектра и порядок величин относительных амплитуд.

Далее был проведен многопараметрический анализ устойчивости D-3He плазмы центральной ячейки реактора по отношению к раскачке Альфвеновских и быстрых магнитозвуковых колебаний на продуктах термоядерной реакции. Выяснено, что характерные инкременты этих неустойчивостей в базовом варианте реактора: $\beta_z=0.7$, $T_{fuel}=70$ кэВ на порядок превышают характерные инкременты в D-T реакторе.

Было проведено многопараметрическое исследование этих неустойчивостей с целью определить границу устойчивости. Из найденных условий стабилизации практический интерес представляет только повышение β_z до величин порядка 0.95-0.97 (Рис. 2). Другие пути стабилизации неустойчивостей:

- уменьшение радиуса плазмы до ≈ 20 см. (неприемлемо из-за резкого уменьшения объемного энерговыделения);
- полная откачка продуктов синтеза до уровня парциальных бета шлаков $\beta_{ash} \approx 0$ (неприемлемо из-за полной потери продуктов синтеза как источника нагрева плазмы);
- снижение магнитного поля с 5 Тл до 0.5-1 Тл, (для D-3He реакции неприемлемо из-за уменьшения выделяющейся энергии синтеза).

Исследовано влияние разных механизмов раскачки и стабилизации электромагнитных колебаний. Выяснено, что основным стабилизирующим механизмом является циклотронное затухание на ионах горючего и затухание из-за черенковского эффекта с учетом КЛР (Рис 3,4).

В главе 4 представлены результаты многопараметрического анализа устойчивости плазмы в экспериментальной установке GAMMA-10. Выбор объясняется тем, что на сегодня это крупнейшая в мире экспериментальная амбиполярная открытая ловушка и на ней ведутся активные эксперименты по изучению свойств низкочастотных микронеустойчивостей.

В качестве базового варианта были взяты параметры плазмы, зафиксированные в экспериментах по исследованию Альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости:

Таблица 1.

$T_{\perp}$	$T_{\parallel}$	T_e	$n_e = n_i$
3 кэВ	0.3 кэВ	1 кэВ	$1.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$

Ранее было установлено хорошее совпадение расчетны и экспериментальных данных по АИЦН в плазме центральной секции установки GAMMA-10. Было выявлено влияние разных параметров плазмы на инкременты неустойчивостей, их частотный диапазон и границу устойчивости.

В частности, установлено следующее. Граница устойчивости Альфвеновских колебаний показана на Рис.5 (нижняя кривая). Установлено, что стабилизация неустойчивости наступает при меньших величинах отношения T_i/T_e , чем предсказывается теорией для случая бесконечной плазмы. Этот результат позволяет изменить требования, предъявляемые к потенциальным барьерам - не требуется максвеллизация ионной компоненты (выравнивание температур), следовательно барьеры могут быть ниже.

Выяснено влияние температуры ионов и электронов и концентрации плазмы на устойчивость. Выяснено, что увеличение плотности плазмы в 2.5 раза при подавленной АИЦН ведет к резкому росту инкрементов, удвоению частотного диапазона неустойчивости (Рис.6) и сдвигу границы устойчивости в область более высоких значений $T_{\parallel}$ (рис.5 верхняя кривая). Высказано предположение, что АИЦН является одним из механизмов, отвечающих за неудачные попытки повысить плотность плазмы в открытых системах.

Указать путь обеспечения устойчивых режимов удержания плазмы при больших плотностях.

В приложении А приведен вывод выражения (2) для инкремента неустойчивости.

В приложении Б приведено решение уравнения Фоккер-Планка для продуктов синтеза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Разработан численный метод исследования в кинетическом приближении низкочастотных электромагнитных колебаний в однородной плазме центральной секции амбиполярной ловушки, учитывающий конечный радиус системы. Метод позволяет для произвольно выбранной моды одной из ветвей колебаний, задав лишь азимутальное и радиальное волновые числа, определить: радиальную структуру моды и инкремент (декремент) колебаний. Также метод позволяет учесть произвольный сортовой состав плазмы и задать для каждой компоненты функцию распределения либо максвелловскую, либо определенную из решения уравнения Фоккер-Планка. Появляется возможность изучать влияние различных механизмов раскачки и стабилизации колебаний.

2. Разработан пакет программ для численного моделирования низкочастотных электромагнитных колебаний плазмы центральной секции амбиполярной ловушки, с учетом геометрических размеров и плазменных параметров характерных и для сегодняшних экспериментальных систем и для перспективных термоядерных реакторов. Метод позволяет рассчитывать в квазилинейном приближении релаксацию, неустойчивых колебаний и определять их амплитудные спектры, что позволяет легко интерпретировать экспериментальные результаты.

3. Установлены дополнительные требования к параметрам плазмы D-3Не реактора, обеспечивающие устойчивость по отношению к раскачке

альфвеновской и магнитозвуковой неустойчивостей. Устойчивость плазмы достигается при повышении суммарного бета плазмы до уровня $\beta_E \approx 0.95$, при вакуумном магнитном поле $B_0 = 5$ Тл.

4. Проведен анализ альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости в плазме центральной секции амбиполярной ловушки GAMMA-10. Определена граница диапазонов параметров, в которой обеспечивается эффективное подавление этой неустойчивости. Выполнены расчеты прогностического характера для случая больших плотностей плазмы. Показано, что без подавления альфвеновской неустойчивости повышение плотности в 2.5 раза вызовет увеличение характерных инкрементов на порядок. Полученные результаты позволяют облегчить набор требований к системе удержания, а именно к высоте потенциальных барьеров.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Ляхов А.Н., Хвесьюк В. И. Стабилизация кинетических неустойчивостей в амбиполярном реакторе на D-3He. // Письма в ЖТФ. - 1996. - Т. 22, вып. 12. - С. 29-33.

2. Lyakhov A.N., Khvesyuk V.I. Kinetic stability of D-3He plasma in the central cell of tandem mirror // Proc. of 23rd EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. - Kiev, 1996. - Paper C016.-4c.

3. Khvesyuk V.I., Semenov D.V., Lyakhov A.N. Physical principles of D-3He fusion // Proc. of 23rd EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. - Kiev, 1996. - Paper C015.-4c.

4. Lyakhov A.N., Khvesyuk V.I. Investigation of AIC instability in GAMMA-10 tandem mirror // Proc. of Intern. Conf. on Plasma Physics ICPP-96. - Nagoya, 1996. - Paper 10A05.-4c.

5. Khvesyuk V.I., Semenov D.V., Lyakhov A.N. Instabilities and power

balance in D-3He tandem mirror with $\beta \sim 1$ // Proc. of Intern. Conf. on Plasma
Physics ICPP-96.- Nagoya, 1996.- Paper 10A06 -4c.

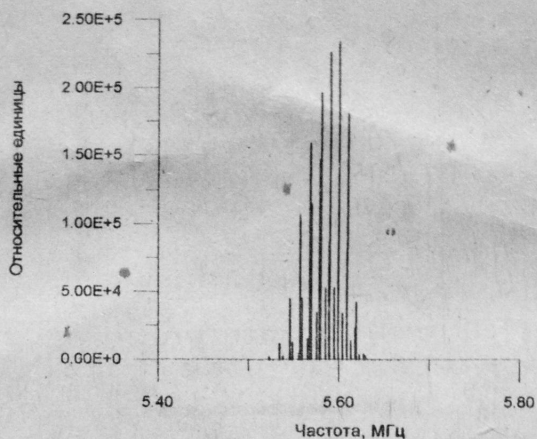


Рис.1 Расчетный спектр альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости в центральной секции амбиполярной ловушки GAMMA-10.

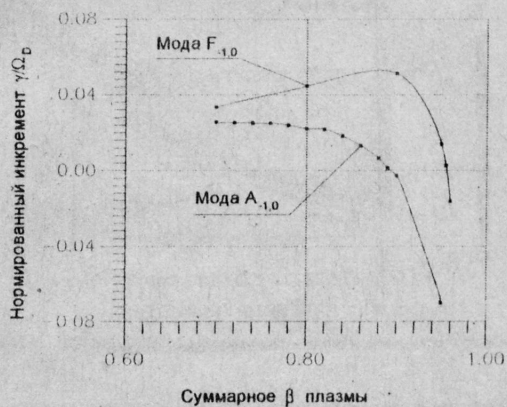


Рис.2. Стабилизация низкочастотных электромагнитных неустойчивостей в D-3He плазме при повышении β_E .

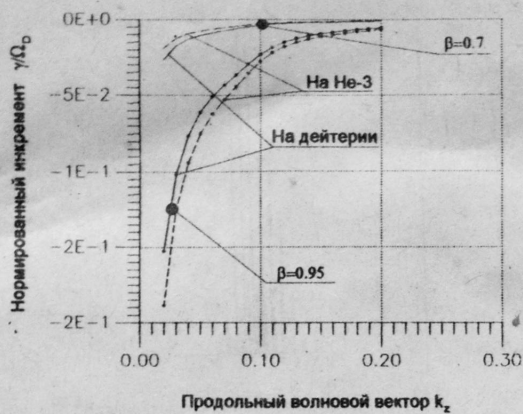


Рис.3. Декремент затухания колебаний на черенковском резонансе с учетом эффектов КЛР.

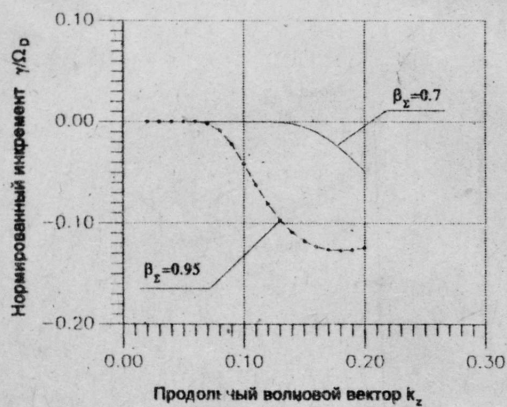


Рис.4. Декремент циклотронного затухания на дейтерии.

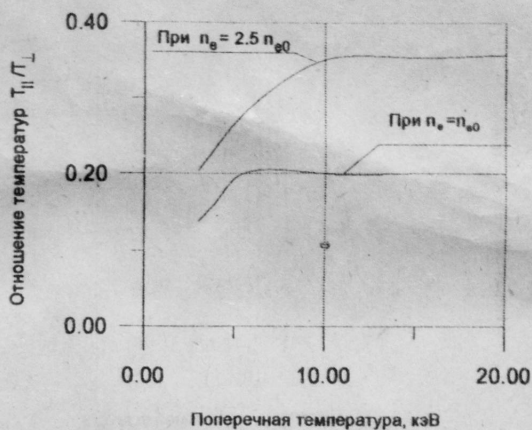


Рис.5. Граница устойчивости альфвеновских колебаний в центральной секции амбиполярной ловушки GAMMA-10.



Рис.6. Изменение границ неустойчивого диапазона частот для альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости в установке GAMMA-10.