

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



АНДРУШЕНКО Жянна Николаевна

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЧАСТИЦ  
НА МГД СТРУКТУРЫ В ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЕ

Специальность 01.04.08 - физика и химия плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1994

533.9

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00344060 (H)

Диссертация являється рукописом.

Работа выполнена в Институте ядерных исследований АН Украины,  
г. Киев.

Научный руководитель: кандидат физико - математических наук,  
зав. лаб. ИЯИ АН Украины  
Черемных Олег Константинович.

Официальные оппоненты: доктор физико - математических наук,  
доцент ХГУ Егоренков Владимир Дмитриевич,  
г. Харьков:

доктор физико - математических наук,  
старший научный сотрудник ИРЭ АН Украины  
Филиппов Юрий Федорович, г. Харьков.

Ведущая организация: ИИЦ "Харьковский физико - технический  
институт"

Защита состоится " 3 " июня 1994 г. в 17 часов  
на заседании Специализированного совета Д 053.06.01  
в Харьковском государственном университете по адресу:  
310108, г. Харьков - 108, пр. Курчатова 31, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной  
библиотеке Харьковского государственного университета.

Автореферат разослан " 19 " апреля 1994 г.

Учёный секретарь  
Специализированного совета  
доктор физико-математических  
наук, профессор

Азаренков Н. А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Актуальность темы.

Термоядерный реактор на основе токамака или стелларатора может представлять практический интерес лишь при относительно большом давлении плазмы, когда отношение газокINETического давления к давлению магнитного поля  $\beta = 8\pi P/B^2$  порядка 5-6% [1, 2]. При таком давлении основную опасность с точки зрения устойчивости плазмы представляют так называемые баллонные моды желобковой и винтовой неустойчивостей, проявляющиеся в развитии возмущений на внешнем обводе тора.

Одной из возможностей достижения столь высоких давлений в экспериментальных установках является использование различных методов дополнительного нагрева, что приводит к появлению в плазме группы высокоэнергетичных ионов. Взаимодействие этих частиц с МГД колебаниями в горячей плазме может приводить как к стабилизации МГД неустойчивостей запертыми частицами [3, 4], так и к существенному повышению МГД-активности плазмы, приводящей к развитию различных МГД-неустойчивостей и выбросу частиц на стенку установки [4-7].

Развитие нелинейной теории волн привело к появлению в физике плазмы новых понятий - уединенная волна, уединенный вихрь, солитон. В настоящее время исследования по образованию и динамике регулярных вихревых структур в плазме представляет собой одну из наиболее быстро и активно развивающихся областей нелинейной физики плазмы [8, 9]. Интерес к таким исследованиям обусловлен, в частности, возможностью аномального выноса частиц из плазмы за счет их вовлечения в вихревые структуры. В условиях термоядерных установок наиболее существенное влияние на такие вихревые структуры могут оказывать высокоэнергетичные частицы с температурой, значительно превышающей температуру основной компоненты, появляющиеся в плазме в результате дополнительного нагрева или при протекании термоядерной реакции.

В связи с этим представляет интерес исследование взаимодействия высокоэнергетичных частиц с желобковыми и баллонными МГД колебаниями плазмы, а также изучение влияния внешних воздействий на характеристики желобковых и баллонных

вихрей, в результате которых может изменяться поток частиц, выносимых из плазмы.

Этим объясняется актуальность настоящей диссертации, которая посвящена теоретическому исследованию влияния высокоэнергетических частиц на МГД структуры в горячей плазме.

### Цели работы.

Диссертационная работа преследует следующие цели:

- изучение влияния высокоэнергетических пролетных и запертых частиц на собственные ветви колебаний, т.е., исследование возможности раскачки кинетического аналога желобковых и баллонных мод, нахождение ветвей собственных колебаний указанных мод и исследование условий их реализации в токамаке и стеллараторе;
- исследование различных режимов взаимодействия запертых высокоэнергетических частиц с МГД колебаниями плазмы, приводящих как к улучшению, так и к ухудшению устойчивости плазмы в зависимости от параметров плазмы и частиц;
- изучение регулярных вихревых структур желобкового и баллонного типа в термоядерной плазме, нахождение стационарных решений и исследование влияния высокоэнергетических частиц на желобковые и баллонные вихри в плазме;

### Научная новизна.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- установлено, что в токамаке и стеллараторе с плоской круговой осью пролетные и запертые надтепловые ионы могут реализовать кинетический аналог идеальной желобковой моды, найдены ветви собственных колебаний и получено выражение для максимального инкремента этих мод в токамаке и стеллараторе;
- показано, что запертые частицы, в отличие от пролетных, расширяют область устойчивости плазмы, на границе которой реализуется кинетическая мода с инкрементом, значительно меньшим желобкового;
- показано, что запертые высокоэнергетические частицы могут оказывать существенное влияние на БЖМ и их устойчивость: найдены два режима взаимодействия быстрых запертых частиц с БЖМ;
- показано, что возбуждаемые горячими частицами БЖМ могут

приводить как к улучшению, так и к ухудшению устойчивости плазмы в зависимости от параметров плазмы и давления быстрых частиц:

- проанализирована возможность возбуждения "fishbone" колебаний пролетными и запертыми частицами;

- получена модельная система уравнений, которая описывает как линейные, так и нелинейные свойства желобковых и баллонных колебаний плазмы с компонентой горячих частиц;

- найдены стационарные решения, описывающие локализованные вихревые структуры желобкового и баллонного типа; показано, что наличие горячей компоненты плазмы приводит к изменению области существования вихревых решений.

#### Практическая ценность.

Практическая ценность полученных результатов состоит в следующем. Взаимодействие высокоэнергетичных частиц с желобковыми и баллонными колебаниями плазмы может приводить к возбуждению кинетических аналогов указанных мод и изменению области устойчивости плазмы. При этом предельное значение давления существенно превышает значение, предсказываемое МГД теорией. Эти результаты необходимо учитывать при выборе плазмофизических характеристик токамаков и стеллараторов. Анализ нелинейных свойств желобковых и баллонных колебаний указывает на возможность формирования в горячей плазме нелинейных вихревых структур, взаимодействие которых может приводить к турбулентности плазмы, что может использоваться для объяснения аномального переноса тепла и частиц в термоядерных установках.

Выполненные в диссертации исследования находятся в полном соответствии с программой НИР Института ядерных исследований АН Украины по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу и вошли в отчеты по теме НИР "Альфа частицы и волновые процессы в тороидальных термоядерных реакторах" (№ гос. регистрации 01.88.0037446) и теме ГКНТ "Сепаратриса" (№ гос. регистрации 2/242).

#### На защиту выносятся следующие положения:

1. реализация пролетными и запертыми частицами кинетического аналога идеальной желобковой моды, выражения для максимального

инкремента этих мод в токамаке и стеллараторе:

2. реализация кинетического аналога идеальных БЖМ на пролетных и запертых быстрых частицах: изменение области устойчивости плазмы;
3. генерация запертыми частицами колебаний БЖМ с частотами  $\omega > \omega_{m1}$  и появление области устойчивости в ранее неустойчивой области;
4. модельные системы уравнений, которые описывают как линейные, так и нелинейные свойства желобковых и баллонных колебаний плазмы с горячими частицами;
5. стационарные решения, описывающие локализованные вихревые структуры желобкового и баллонного типа в плазме с горячими частицами; изменение области существования вихревых решений при наличии горячих частиц.

#### Апробация работы.

Основные результаты диссертации были представлены и докладывались на следующих конференциях и совещаниях:

Совещание ТН МАГАТЭ "Альфа частицы в термоядерных исследованиях" (Киев, 1989 г.).

Всесоюзные конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 1990 г., 1991 г.).

Всесоюзная конференция по взаимодействию электромагнитных излучений с плазмой (Душанбе, 1991 г.).

Украинские конференции по УТС и физике плазмы (Киев, 1992 г.; Харьков, 1993 г.).

IX Международный симпозиум МАГАТЭ по стеллараторам (Гархинг, Германия, 1993).

Международная конференция "Физика в Украине" (Киев, 1993 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы (106 наименований). Она содержит 126 страниц, в том числе 104 стр. машинописного текста, 9 стр. с 9 рисунками и 13 стр. списка литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели исследований, научная новизна полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также описана структура диссертации.

В Главе 1 исследуется влияние высокоэнергетичных частиц на желобковые колебания плазмы в токамаках и стеллараторах.

В § 1.1 изучаются желобковые колебания плазмы в приближении одножидкостной гидродинамики. Рассматривается осесимметричный токамак круглого сечения с большим аспектным отношением, параболическим давлением и слабонеоднородным профилем тока. Пренебрегая наличием в плазме горячих частиц, получено уравнение малых колебаний для желобковых мод в токамаке с широм с учетом дрейфовых эффектов. Приведен критерий устойчивости плазмы относительно рассматриваемых мод, найдены частоты их собственных колебаний и соответствующие инкременты. Показано, что собственные частоты колебаний не превышают  $\omega_{m_1}$ , где  $\omega_{m_1}$  - ионная дрейфовая частота. Получено выражение для максимального значения инкремента этих мод.

В § 1.2 исследуется влияние пролетных высокоэнергетичных частиц на желобковые колебания плазмы в токамаке. Пренебрегая вкладом горячих частиц в равновесное давление и используя приближение слабых столкновений, получено уравнение малых колебаний в плазме с пролетными высокоэнергетичными частицами и соответствующее дисперсионное уравнение. Показано, что наличие пролетных частиц приводит к модификации ветвей собственных колебаний и снятию вырождения и расщеплению указанных инкрементов и частот. Проанализировано влияние пролетных частиц на границу устойчивости плазмы. Показано, что помимо чисто магнитогидродинамической желобковой моды в токамаке возможна реализация кинетического аналога этой моды на быстрых пролетных частицах.

В § 1.3 исследуется влияние запертых высокоэнергетичных частиц на желобковые колебания плазмы. Получено уравнение малых колебаний в плазме с запертыми высокоэнергетичными частицами и соответствующее дисперсионное уравнение. Показано, что, как и в случае пролетных частиц, запертые высокоэнергетичные частицы приводят к расщеплению кинетического аналога желобковых колебаний.

однако область неустойчивости в этом случае меньше, чем для пролетных частиц. Совместное влияние запертых частиц и конечного ларморовского радиуса ионов приводит к тому, что в области магнитогиродинамической неустойчивости реализуется кинетическое "окно" устойчивости.

В § 1.4 изучается взаимодействие пролетных и тороидально запертых высокоэнергетичных частиц с желобковыми модами в стеллараторе с плоской крутовой осью в приближении большого аспектного отношения с круглыми "в среднем" магнитными поверхностями и малым давлением. Используя подход, развитый в § 1.1 настоящей главы, и учитывая выражения для метрических коэффициентов в стеллараторе, получено уравнение малых колебаний для желобковых возмущений в стеллараторе с широм с учетом дрейфовых эффектов и найдены максимальные значения инкрементов желобковых колебаний. Оценено влияние горячих частиц на собственные колебания и границу устойчивости желобковых мод. Показано, что процессы взаимодействия высокоэнергетичных частиц с желобковыми модами в стеллараторе и токамаке качественно подобны.

В Главе 2 изучается влияние высокоэнергетичных ионов на баллонные желобковые моды.

В § 2.1 проводится обзор имеющихся к настоящему времени работ по уравнению малых колебаний для БЖМ. Проведен анализ этого уравнения с точки зрения устойчивости плазмы.

В § 2.2 приводятся имеющиеся дисперсионные уравнения для БЖМ в плазме без высокоэнергетичных частиц, которые существенно отличаются друг от друга. Используя метод укороченного функционала, получено обобщенное дисперсионное уравнение для баллонных мод. Показано, что это уравнение уточняет и дополняет все известные ранее дисперсионные уравнения. Приведены частоты и инкременты собственных колебаний и оценена граница устойчивости плазмы относительно раскачки баллонных желобковых мод.

В § 2.3 исследуется взаимодействие высокоэнергетичных частиц с баллонными желобковыми модами. Показано, что появление в плазме быстрых пролетных частиц, как и в случае желобковых колебаний, приводит к модификации дисперсионного уравнения и ветвей собственных колебаний, т. е., реализует кинетический аналог БЖМ на пролетных частицах. Что касается взаимодействия запертых

высокоэнергетичных частиц с БЖМ, то помимо возбуждения кинетического аналога собственных колебаний БЖМ с частотами  $\omega < \omega_{ni}$  (где  $\omega_{ni}$  - дрейфовая частота ионов), существует возможность генерации запертыми частицами колебаний БЖМ с частотами  $\omega > \omega_{ni}$  и появления устойчивого состояния в ранее неустойчивой области. Для частот  $\omega \approx \omega_{ni}$  область устойчивости, а также и предельное по устойчивости давление основной компоненты плазмы увеличиваются, что обусловлено стабилизирующим влиянием запертых частиц на такие низкочастотные колебания: в области частот  $\omega \approx \omega_{D0}$ , где  $\omega_{D0}$  - частота магнитного дрейфа быстрой частицы, зона неустойчивости увеличивается, а критическое по устойчивости давление уменьшается. Таким образом, в зависимости от параметров плазмы и давления горячих частиц, взаимодействие частиц с БЖМ может приводить как к улучшению, так и к ухудшению устойчивости плазмы.

В § 2.4 анализируется возможность возбуждения "fishbone"-колебаний за счет взаимодействия высокоэнергетичных частиц с собственными нейтрально-устойчивыми колебаниями желобковых мод.

В Главе 3 исследуется вопрос об образовании и динамике регулярных вихревых структур желобкового и баллонного типа в термоядерной плазме и влияние горячих частиц на характеристики таких вихрей.

В § 3.1 рассмотрены потенциальные низкочастотные желобковые колебания в плазме с горячими частицами. Ограничивая рассмотрение локальным приближением, т.е., исследуя нелинейные желобковые возмущения в окрестности данной магнитной поверхности с заданным невозмущенным магнитным полем  $B$ , и моделируя кривизну силовых линий магнитного поля введением эффективной силы тяжести  $g$ , получено систему нелинейных уравнений, которая описывает как линейные, так и нелинейные свойства желобковых колебаний.

В § 3.2 приведено дисперсионное уравнение для желобковых колебаний в плазме с горячими частицами. Показано, что наличие горячих частиц приводит к расширению области устойчивости плазмы.

В § 3.3 исследуется влияние высокоэнергетичных частиц на желобковые вихри в плазме. Найдены стационарные решения в форме дипольных вихрей и в виде суперпозиции дипольного и монопольного вихрей, приведены общие свойства этих стационарных решений. Полученные решения характеризуются двумя свободными параметрами -

радиусом вихря и скоростью его распространения и принадлежат к классу так называемых решений с сепаратрисой. Наличие сепаратрисы свидетельствует о том, что данные вихри содержат захваченные частицы. Показано, что наличие горячей компоненты плазмы приводит к изменению области существования вихревых решений в пространстве скоростей.

В § 3.4 изучаются баллонные вихри в плазме с компонентой горячих частиц. Учитывая возмущения магнитного поля, перпендикулярные к равновесному магнитному полю  $B_0$  и используя дрейфовое приближение для описания поведения частиц, получено модельную систему нелинейных уравнений и линейное дисперсионное уравнение для баллонных колебаний плазмы. Найдены стационарные решения в форме локализованных дипольных вихрей. Показано, что влияние горячих частиц на баллонные желобковые вихри в плазме сводится, как и в случае чисто желобковых вихрей, к изменению областей их существования в пространстве скоростей.

В § 3.5 рассматривается желобковая турбулентность плазмы. Поскольку вихри сильно локализованы в пространстве и являются слабозаимодействующими структурами, для их описания применяется статистический подход. Показано, что взаимодействие вихревых структур может приводить к желобковой турбулентности плазмы и усиливать процессы переноса. Оценен спектр желобковой вихревой турбулентности и коэффициент диффузии плазмы.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в токамаке и в стеллараторе с плоской круговой осью пролетные и запертые надтепловые ионы могут раскачивать ветвь собственных колебаний желобковых мод с частотой порядка  $\omega_i$  и демпфировать с частотой  $\gamma_{нгд}^2/\omega_{*i}$ , где  $\gamma_{нгд}$  - инкремент идеальной желобковой моды, т.е., могут реализовать кинетическую желобковую моду. Показано, что запертые частицы, в отличие от пролетных, расширяют область устойчивости плазмы, на границе которой реализуется кинетическая мода с инкрементом, значительно меньшим желобковой. Получены выражения для максимальных значений инкрементов желобковых мод в токамаке и стеллараторе.
2. Показано, что компактный стелларатор с точки зрения

устойчивости плазмы относительно желобковых мод является более выгодным по сравнению с обычным стелларатором. Установлено, что в стеллараторе и токамаке процессы взаимодействия тороидально запертых и пролетных ионов с желобковыми модами качественно подобны друг другу.

3. Показано, что запертые высокоэнергетичные частицы могут оказывать существенное влияние на баллонные моды и их устойчивость. Найдены два режима взаимодействия быстрых частиц с БЖМ. В одном из них, где давление горячих частиц мало, происходит нарастание собственных колебаний с частотами  $\approx \omega_{m_i}$ . При  $\gamma \approx \omega_{m_i}/2$  эти моды непрерывно переходят в идеальные БЖМ. При таких частотах запертые частицы приводят к стабилизации возмущений. Как результат, увеличивается область устойчивости. В другом случае, где давление горячих частиц велико и  $\omega_r \geq \omega_{m_i}$ , возбуждаемые колебания могут приводить как к улучшению, так и к ухудшению устойчивости плазмы в зависимости от параметров плазмы и давления высокоэнергетичных частиц. При благоприятных условиях предельное значение давления существенно превышает значение, предсказываемое МГД теорией. Неустойчивые ветви колебаний приводят к возбуждению "fishbone"-колебаний с частотой  $\approx \omega_{m_i}$  и колебаний с частотой  $\approx \omega_{BD}$  на краях области устойчивости.

4. Получены модельные системы уравнений, которые описывают как линейные, так и нелинейные свойства желобковых и баллонных колебаний плазмы с компонентой горячих частиц. Найдены стационарные решения, описывающие локализованные вихревые структуры желобкового и баллонного типа. Полученные решения характеризуются двумя свободными параметрами - радиусом вихря и скоростью его распространения и принадлежат к классу так называемых решений с сепаратрисой. Наличие сепаратрисы свидетельствует о том, что данные вихри содержат захваченные частицы.

5. Показано, что наличие горячей компоненты плазмы приводит к изменению области существования вихревых решений. Даже в линейно устойчивой плазме желобковые возмущения могут давать существенный вклад в аномальный перенос тепла и частиц посредством вихревой конвекции. Взаимодействие вихревых структур может приводить к желобковой турбулентности плазмы и усиливать процесс переноса.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Andruschenko J.N., Wojko A.Ya., Cheremnykh O.K. Alpha particle effects on ballooning flute modes in tokamak. // A Collection of Papers presented at IAEA Technical Committee Meeting on Alpha Particles in Fusion Research, Kiev, USSR, October 1989. - IAEA, Vienna. - 1989. - Vol. II, p. 564-590.
2. Andrushchenko Zh.N., Wojko A.Ya., Cheremnykh O.K. Interaction of trapped superthermal particles with ballooning flute modes in a tokamak with circular magnetic surfaces. // Nuclear Fusion. - 1990. - 30. - p. 2097-2110.
3. Andrushchenko Zh.N., Wojko A.Ya., Cheremnykh O.K. Alpha Particle Effects on Ballooning Flute Modes in Tokamak. // Fusion Technology. - 1990. - 18. - p. 475-486.
4. Андрущенко Ж.Н., Павленко В.П., Черемных О.К. Спектр желобковой вихревой турбулентности. // Матер. VI-ой Всесоюзной конференции по взаимодействию электромагнитного излучения с плазмой. Душанбе. - 1991. - с. 56.
5. Андрущенко Ж.Н., Павленко В.П., Черемных О.К. Желобковые вихри в плазме с горячими частицами. // Физика плазмы. - 1992. - 18, № 1. - с. 47-53.
6. Андрущенко Ж.Н., Омельченко А.Я., Черемных О.К. О взаимодействии горячих ионов с желобковыми модами в стеллараторе. // Препринт ХФТИ 93-6. - Харьковский физико-технический институт. - 1993. - 21 с.
7. Andrushchenko Zh.N., Cheremnykh O.K., Omel'chenko A.Ya. The influence of fast particles on flute modes in stellarators. // A Collection of Papers Presented at IAEA Technical Committee Meeting on Stellarators and other helical confinement systems, Garching, Germany, May 1993. - IAEA, Vienna. - 1993. - p. 206-211.

ЛИТЕРАТУРА

1. ITER Physics. ITER documentation series No. 21. International Atomic Energy Agency, Vienna. - 1991. - 307 p.
2. Волков Е.Д., Супруненко В.А., Шишкин А.А. Стелларатор. Киев. Наукова думка, 1983. - 200 с.

3. Porcelli F. Fast particle stabilization. // Plasma Physics and Controlled Fusion. - 1991. - 33. - p. 1601-1620.
4. Coppi B., Miglinolo S., Pegoraro F., Porcelli F. Global Modes and High-Energy Particles in Ignited Plasmas. // Physics of Fluids. - 1990. - B2. - p. 927-943.
5. Chen L., White R.B., Rosenbluth M.N. Excitation of Internal Kink Modes by Trapped Energetic Beam Ions. // Phys. Rev. Lett. - 1984. - 52. - p. 1122-1125.
6. Spong D.A., Sigmar D.J., Cooper W.A., et al. Effects of Trapped Alpha Particles on Ballooning Modes in Tokamaks. // Physics of Fluids. - 1985. - 28. - p. 2494-2501.
7. Coppi B., Porcelli F. Theoretical Model of Fishbone Oscillations in Magnetically Confined Plasma. // Phys. Rev. Lett. - 1986. - 57. - p. 2272-2275.
8. Horton W. Drift wave vortices and anomalous transport. // Physics of Fluids. - 1989. - B1. - p. 524-537.
9. Петвиашвили В.И., Похотелов О.А. Уединенные вихри в плазме и атмосфере. М.: Энергоатомиздат, 1989. - 200 с.

Андрущенко Жанна Николаевна

ВЛИЯНИЕ ВИСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЧАСТИЦ  
НА МГД СТРУКТУРЫ В ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЕ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Усл. - печ. л. 0.76

Подписано к печати 22.04.94

Тип. заказ № 30, тираж 100.

ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АН УКРАИНЫ

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України



AE 30068

**AB 30.068**