

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



БУРДО Олег Семенович

**ТЕОРИЯ КВАЗИЖЕЛОБКОВЫХ МОД
В ТОРОИДАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ**

Специальность 01.04.08 - физика и химия плазмы

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Харьков - 1996



00739479 (\$)

Диссертация является рукоп

Работа выполнена в Инстит

НАН Украины.

Научные руководители: член-корреспондент НАН Украины,
доктор технических наук
САМОЙЛЕНКО Юрий Иванович
кандидат физико-математических наук
ЧЕРЕМНЫХ Олег Константинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
ШИШКИН Александр Александрович
кандидат физико-математических наук
МЕЛЬНИК Валентин Николаевич

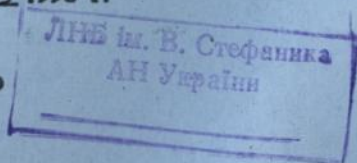
Ведущая организация : Институт теоретической физики
им. Н.Н.Боголюбова НАН Украины

Защита состоится "17" мая 1996 г. в 17⁰⁰ часов
на заседании Специализированного совета Д 02.02.12
при Харьковском государственном университете по адресу:
310108 г. Харьков, пр-т Курчатова, 31, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке Харьковского государственного университета по
адресу: 310077 г. Харьков, пл. Свободы, 4.

Автореферат разослан "08" апреля 1996 г.

Ученый секретарь Специализированного
ученого Совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Азарников Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Неустойчивости плазмы различных видов в тороидальных ловушках имеют общий источник происхождения - сильную неравновесность высокотемпературной плазмы. Источниками энергии для развития неустойчивостей плазмы в тороидальных системах являются энергия токового магнитного поля и тепловая энергия плазмы. Энергия магнитного поля обеспечивает развитие самой мощной неустойчивости - винтовой [1], опасность которой заключается в том, что эта неустойчивость представляет собой возмущение, затрагивающее все сечение плазменного шнура. Правильный выбор профиля тока и наличие высокопроводящего кожуха и/или наличие обратных связей могут подавлять винтовую неустойчивость [2,3]. В отсутствие винтовой неустойчивости возрастает значение неустойчивостей, связанных с тепловой энергией плазмы. К таким неустойчивостям относятся порождаемые градиентом давления плазмы и кривизной линий магнитного поля желобковая и баллонная неустойчивости.

Факторы развития неустойчивости существенно различаются в зависимости от соотношения между энергией магнитного поля и энергией, запасенной в плазме. Если ввести параметр $\beta = 8\pi p/B_0^2$, то характер неустойчивости, развивающейся при конечных β (плазма высокого давления) совершенно не похож на характер неустойчивости в случае $\beta \ll 1$ (плазма низкого давления).

Термоядерный реактор на основе токамака или стелларатора будет представлять практическую ценность лишь при достаточно высоком давлении плазмы (β порядка десятков процентов) [4,5]. Плазма большого давления формируется при использовании различных способов до-

полнительного нагрева, как например, ВЧ-нагрев в широком диапазоне длин волн и инжекция нейтральных атомов. Эти новые факторы влияют на протекающие в плазме процессы, и их изучение представляет собой самостоятельный научный интерес.

Инжекция нейтральных атомов приводит к появлению в плазме высокоэнергетичных ионов, что существенно повышает МГД активность плазмы и может повлечь развитие различных МГД неустойчивостей и привести к ухудшению удержания плазмы.

С другой стороны, наличие периодических неоднородностей магнитного поля или ВЧ-воздействие на плазму может запирает высокоэнергетичные частицы и приводить к стабилизирующим эффектам.

Вследствие этого появляется необходимость исследования взаимодействия баллонных мод и мод Мерсье с высокоэнергетическими частицами, т.е. изучения кинетического возбуждения этих мод.

С приближением параметров тороидальных систем к термоядерным становится все более актуальным учет стабилизирующего влияния конечного ларморовского радиуса ионов (КЛР) ввиду увеличения самого ларморовского радиуса.

Учет влияния КЛР на устойчивость плазмы, а также результаты взаимодействия пролетных и запертых частиц с фоновой плазмой основаны на знании дисперсионных соотношений для слабобаллонных мод, к которым относятся моды Сайдема-Мерсье и баллонные моды.

Исследованию влияния КЛР было посвящено достаточное количество работ, общим недостатком которых являлось то, что они основывались на достаточно приблизительных дисперсионных соотношениях. Последнее обстоятельство к тому же существенным образом влияло на конечные результаты. В связи с этим особенно актуальным представляется получение максимально точных дисперсионных соотношений для

указанных возмущений и анализ влияния КЛР на границу устойчивости.

Цель работы.

Целью настоящей диссертационной работы является изучение мелкомасштабных возмущений квазижелезобового типа в тороидальных плазменных ловушках типа токамак и стелларатор и влияния этих возмущений на устойчивость плазмы в указанных ловушках.

Научная новизна.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые получена замкнутая система мелкомасштабных МГД уравнений, пригодная для описания произвольных мелкомасштабных МГД возмущений в тороидальных ловушках, и получены общегеометрические дисперсионные соотношения для указанных возмущений, а также показано, что эти дисперсионные соотношения находятся в хорошем соответствии с результатами численных экспериментов;
- впервые сформулирован общегеометрический критерий устойчивости мелкомасштабных МГД возмущений в тороидальных системах с малым широм и конечным ларморовским радиусом ионов;
- впервые найдены условия реализации мод Сайдема-Мерсье и баллонных мод и критерии их устойчивости;
- впервые показано, что применение слабобаллонного приближения эквивалентно анализу возмущений в фурье-пространстве волновых чисел с помощью корректно использованного метода возмущений для всех известных двумерных моделей токамака и стелларатора;
- впервые исследовано влияние анизотропии плазмы стелларатора на МГД устойчивость мод Мерсье;

- аналитически и численно исследованы спектры баллонных желобковых мод.

Практическая ценность.

Практическая ценность работы обусловлена как актуальностью рассматриваемой темы, так и пригодностью полученных результатов и разработанных численных алгоритмов для анализа и расчета широкого класса тороидальных установок, в частности, было рассчитано влияние конечности ларморовского радиуса ионов на МГД устойчивость плазмы в торсатроне "Ураган-2М".

На защиту выносятся следующие положения:

1. Замкнутая система мелкомасштабных МГД уравнений, способных описывать произвольные мелкомасштабные МГД возмущения в тороидальных ловушках.
2. Общегеометрические дисперсионные соотношения для мелкомасштабных МГД возмущений в тороидальных замкнутых конфигурациях.
3. Общегеометрический критерий устойчивости мелкомасштабных МГД возмущений в тороидальных системах с малым широм и конечным ларморовским радиусом ионов.
4. Условия реализации мод Сайдема-Мерсье и баллонных мод и критерии их устойчивости.
5. Аналитические и численные спектры баллонных желобковых мод.
6. Критерий Мерсье для анизотропной плазмы стелларатора с плоской круговой магнитной осью.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации были представлены и докладывались на следующих конференциях:

Украинские конференции по УТС и физике плазмы (Киев, 1992 г., Харьков, 1993 г., Киев, 1994 г.).

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

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

22-я Европейская конференция по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы (Борнмут, Соединенное Королевство, 1995 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, заключения, четырех приложений и списка литературы (83 наименования). Она содержит 135 страниц, в том числе 109 стр. машинописного текста, 17 стр. с 14 рисунками и таблицей и 9 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 получены общегеометрические дисперсионные соотношения пригодные для описания мелкомасштабных квазижелобковых мод сайдемовского типа, а также для баллонных мод в произвольных тороидальных плазменных конфигурациях.

В §1.1 обсуждена связь уравнения, ранее выведенного Кулсрудом для описания устойчивости стелларатора с большим аспектным отношением и винтовыми обмотками с широм, с описанием возмущений желобкового типа в произвольной ловушке с широм. Приведены соображения в пользу расширения области применимости этого уравнения на произвольные тороидальные ловушки, получения общегеометрических дисперсионных соотношений и учета конечности ларморовского радиуса.

В §1.2 приведена система уравнений для компонент вектора смещения плазмы и описана основанная на использовании предположения о несжимаемости плазмы, произвольной потоковой системе координат и выборе возмущений в виде сайдемовских или (в случае малого шира и давления) баллонных (слабобаллонное приближение) мод процедура сведения этой системы уравнений к уравнению для радиальной компоненты смещения. Предложена процедура получения усредненного уравнения для радиальной компоненты указанных возмущений.

В §1.3 полученное уравнение приведено к виду стационарного уравнения Шредингера. Показано, что условие отсутствия дискретного спектра собственных значений уравнения Шредингера совпадает с общегеометрическим критерием устойчивости Мерсье.

В §1.4 выведены асимптотические дисперсионные соотношения для инкрементов неустойчивости идеальной плазмы относительно желобковых возмущений с использованием метода возмущений и квазиклассического приближения. Сопоставление полученных из уравнения Шредингера асимптотических выражений с результатами численного решения исходного уравнения позволяют определить области применимости этих выражений.

В §1.5 исследовано влияние конечности ларморовского радиуса

ионов на неустойчивости плазмы относительно желобковых возмущений. Показано, что при учете КЛР неустойчивость квазижелобковых возмущений приобретает пороговый характер. Сформулирован также общегеометрический критерий устойчивости бесшировых тороидальных конфигураций относительно желобковых возмущений с учетом КЛР.

В §1.6 исследовано влияние конечности ларморовского радиуса ионов на МГД устойчивость плазмы в торсатроне "Ураган-2М" в предположении резкой границы плазмы. Полученные результаты, справедливые для достаточно произвольных профилей, свидетельствуют о сокращении зон МГД неустойчивости, полученных при помощи критерия Мерсье.

В §1.7 в пренебрежении влиянием запертых частиц получен аналитический критерий устойчивости анизотропной плазмы в стеллараторе с плоской круговой осью относительно возбуждения мод типа Мерсье. Слагаемые, входящие в этот критерий, выражаются через основные равновесные параметры установки.

Показано, что характерное время развития неустойчивости не превышает характерное время $\tau \sim a/v_{Ti}$ возбуждения обычной желобковой неустойчивости в цилиндрическом столбе плазмы, причем в стеллараторе эти моды возрастают в (R/a) раз быстрее, нежели в токамаке с аналогичными параметрами. Кроме того, установлено, что для квазижелобковых возмущений анизотропия плазмы существенна в случае, когда в критерии устойчивости тороидальные слагаемые сравнимы со стеллараторными, а ее влияние оказывается стабилизирующим при $P_1 > P_1$.

В §1.8 обсуждаются результаты, полученные в Главе 1.

В Главе 2 построена теория квазижелобковых возмущений в тороидальных плазменных конфигурациях.

В §2.1 приведено уравнение, описывающее квазижелобковые возмущения, а также приведены их основные типы. Отмечено, что в различных предельных случаях соотношения коэффициентов уравнения, выражающихся через параметры плазмы и установки, имеет место существенное отличие известных условий устойчивости, и формулируются требования к построению, позволяющему интерпретировать как указанные предельные, так и промежуточные случаи в рамках единого подхода.

В §2.2 выведено уравнение малых колебаний для квазижелобковых возмущений в тороидальных магнитных ловушках. Показано, что в случае тороидальной системы со слабоэллиптическими магнитными поверхностями и плоской круговой осью для параболического профиля давления это уравнение совпадает с "дистиллированным" баллонным уравнением, в котором обычная баллонная переменная заменена отношением радиальной и полоидальной компонент волнового вектора. Показано также, что баллонное представление для квазижелобковых мод сводится в окрестности резонансной поверхности к преобразованию Фурье.

В §2.3 уравнение малых колебаний приведено к виду стационарного уравнения Шредингера. Показано, что условие отсутствия дискретного спектра собственных значений этого уравнения приводит либо к критерию Мерсье, либо к критерию, близкому к критерию устойчивости слабобаллонных мод. Сформулировано необходимое условие устойчивости квазижелобковых возмущений в тороидальных магнитных ловушках, не зависящее от их структуры.

В §2.4 выведены дисперсионные соотношения для квазижелобковых мод, т.е. соотношения, определяющие инкременты неустойчивости идеальной плазмы в условиях, когда нарушен критерий устойчивости Мерсье. При выводе использовано решение уравнения Бора-Зоммер-

фельда для квазиклассического приближения и метод возмущений для спектра ангармонического осциллятора. Проведено сравнение асимптотических дисперсионных соотношений с численным решением уравнения малых колебаний.

В §2.5 выведены дисперсионные соотношения для инкрементов возмущений, раскачивающихся в условиях выполнения критерия Мерсье, - слабобаллонных мод. Приведены также численные результаты. Кратко обсужден случай непараболического профиля давления.

В §2.6 обсуждены результаты, полученные в Главе 2.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Получено общегеометрическое уравнение малых колебаний

$$\frac{V'^2}{\Phi'^4} \left[(\gamma_S)^2 - \langle K \rangle \langle \alpha_S \rangle - \mu' \langle \gamma_S \rangle \frac{\Phi'^2}{V'} + \frac{4\pi^2}{\Phi'^2} m^2 x^2 \langle \alpha_S \rangle \left\langle \frac{S^2}{|\nabla a|^2} \right\rangle \right] \xi_0 -$$

$$- \mu'^2 \frac{d}{dx} \left(x^2 \frac{d\xi_0}{dx} \right) + \frac{R^2 \gamma^2}{c_A^2} \left(\frac{d^2 \xi_0}{dx^2} - \frac{m^2}{a^2} \xi_0 \right) = 0,$$

справедливое для мелкомасштабных поперек магнитного поля квази-желобковых возмущений сайдемовского типа

$$k_r \gg k_\theta \gg b^{-1} \gg k_l$$

при значениях давления плазмы вплоть до давлений $\beta \sim b\mu^2/R$ и при достаточно большом шире $a\mu'/\mu \sim 1$, а также для баллонных возмущений

$$k_r, k_\theta \gg b^{-1}, k_l$$

в случае плазмы с малым широм $a\mu'/\mu \ll 1$ и давлением $\beta \ll b\mu^2/R$.

2. Упомянутое уравнение малых колебаний приведено к виду стационарного уравнения Шредингера

$$\frac{d^2 \psi}{dz^2} + [E - U(z)] \psi = 0.$$

Показано, что в пределе идеальной магнитной гидродинамики условие отсутствия дискретных собственных значений уравнения Шредингера совпадает с хорошо известным критерием устойчивости Мерсье

$$\frac{\mu'^2}{4} + \frac{V'^2}{\Phi'^4} \left(\langle \gamma_s \rangle^2 - \langle K \rangle \langle \alpha_s \rangle - \mu' \langle \gamma_s \rangle \frac{\Phi'^2}{V'} \right) > 0.$$

Таким образом, область применимости критерия Мерсье устойчивости плазмы расширена на баллонные возмущения в случае малых давлений плазмы.

3. Для указанных возмущений получены асимптотические дисперсионные соотношения, т. е. зависимости инкремента неустойчивости идеальной плазмы Γ от параметра Мерсье G и параметра баллонности σ^2 , являющихся, в свою очередь, функциями параметров плазмы и установки. Дисперсионные соотношения получены:

- методом возмущений

$$G \approx \Gamma^2 + \frac{3}{4} + \left(\Gamma^2 - \frac{1}{4} \right)^{1/2} (2N+1) + \frac{1}{2} N(N+1) - \\ - \frac{1}{72} \left(\Gamma^2 - \frac{1}{4} \right)^{-1/2} (34N^3 + 51N^2 + 59N + 21) \quad \text{для } \Gamma^2 \sim G \gg 1;$$

- в рамках квазиклассического приближения

$$2\Gamma \sqrt{\eta_+^2 - \eta_-^2} \left[\frac{\eta_+^2 + 1}{\eta_+^2 - \eta_-^2} K \left(\frac{\eta_+^2}{\eta_+^2 - \eta_-^2} \right) - E \left(\frac{\eta_+^2}{\eta_+^2 - \eta_-^2} \right) - \right. \\ \left. - \frac{\eta_+^2 + 1}{\eta_+^2 - \eta_-^2} \Pi \left(\frac{\eta_+^2}{\eta_+^2 + 1}, \frac{\eta_+^2}{\eta_+^2 - \eta_-^2} \right) \right] = \left(N + \frac{1}{2} \right) \pi \quad \text{для } G \sim \Gamma \gg 1;$$

$$\left[\frac{\eta_+^2 + \eta_-^2 + 1}{\eta_+^2} K \left(\frac{\eta_+^2 - \eta_-^2}{\eta_+^2} \right) - E \left(\frac{\eta_+^2 - \eta_-^2}{\eta_+^2} \right) - \frac{\eta_-^2 + 1}{\eta_+^2} \Pi \left(\frac{\eta_+^2 - \eta_-^2}{\eta_+^2 + 1}, \frac{\eta_+^2 - \eta_-^2}{\eta_+^2} \right) \right] \times \\ \times \Gamma \eta_+ = (2N + 1)\pi \pm \exp \left[-\pi \left(1/2 - \sqrt{G - 1/4} \right) \right] \quad \text{для } G < 1/2,$$

где $K(a)$, $E(a)$ и $\Pi(a, b)$ - полные эллиптические интегралы соответственно первого, второго и третьего рода, а величины η_{\pm} определяются выражением

$$\eta_{\pm} = \left[G - 1/4 - 2\Gamma^2 \pm \sqrt{(G - 1/4)^2 - \Gamma^2} \right] / 2\Gamma^2.$$

Найдены области применимости полученных соотношений.

4. Сформулирован общегеометрический критерий устойчивости мелко-масштабных магнитогидродинамических возмущений в тороидальных системах с малым широм и конечным ларморовским радиусом ионов. Отмечено, что неустойчивость квазижелезобковых колебаний при учете КЛР ионов приобретает пороговый характер: частота и инкремент этой неустойчивости равны соответственно

$$\omega_r = \frac{\omega_*}{2} \quad \text{и} \quad \gamma = \sqrt{\Gamma_{MHD}^2 \omega_A^2(s)^2 - \omega_*^2 / 4}$$

и, кроме того,

$$\Gamma_{MHD} > \frac{1}{2} \frac{\omega_*}{\omega_A(s)}.$$

5. На примере расчета воздействия КЛР ионов на МГД устойчивость плазмы в торсатроне "Ураган-2М" продемонстрированы как возможность расчета конкретных установок с учетом влияния геометрии и пространственной неоднородности магнитного поля, так и приемлемость экономических характеристик разработанного математического обеспечения. Продемонстрировано существенное сужение зон неустойчивости под влиянием эффекта КЛР.

6. Получен аналитический критерий устойчивости анизотропной плазмы в стеллараторе с широм и плоской магнитной осью в пренебрежении влиянием запертых частиц относительно возбуждения мод типа Мерсье, причем компоненты этого критерия могут быть выражены через основные равновесные параметры установки.

Определено характерное время развития неустойчивости в стеллараторе, которое также сопоставлено со временем раскачки неустойчивости в токамаке со сравнимыми параметрами. Установлены также условия, при которых анизотропия плазмы существенна для квазижелобковых возмущений.

7. Найдены условия реализации мод Сайдма-Мерсье ($\sigma^2 \leq 1/4$) и баллонных мод ($\sigma^2 > 1/4$) и их общий критерий устойчивости

$$\frac{1}{4} - G > \left(\sigma^2 - \frac{1}{4} \right) \Theta \left(\sigma^2 - \frac{1}{4} \right),$$

где $\Theta(x)$ - ступенчатая функция Хевисайда.

8. Для исследования условий возбуждения квазижелобковых мод и нахождения их дисперсионных соотношений "дистиллированное" баллонное уравнение было сведено к виду стационарного уравнения Шредингера, что позволило трактовать рассматриваемые моды как дискретные уровни "энергии" в некоторой потенциальной яме.

Показано, что в зависимости от вида потенциальной ямы существует два режима возбуждения квазижелобковых мод, что связано с наличием или отсутствием отрицательных уровней "энергии" в этой яме. Моды, соответствующие уровням с отрицательной энергией, могут возбуждаться только при выполнении условия $\sigma^2 > 1/4$, и для них справедлив критерий устойчивости баллонных мод. При $\sigma^2 \leq 1/4$ существуют лишь моды с положительной "энергией", устойчивость которых определяется

критерием Мерсье. Для обоих режимов возбуждения квазижелобковых мод выведены аналитические дисперсионные соотношения, которые удовлетворительно аппроксимируют результаты численного решения "дистиллированного" баллонного уравнения в соответствующих областях параметров.

9. Показано, что для квазижелобковых мод, локализованных вблизи резонансной поверхности, баллонное представление (eikonal representation) сводится к преобразованию Фурье.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Burdo O.S., Cheremnykh O.K., Revenchuk S.M., Omel'chenko A.Ya. Criterion of Stability of Plasma with Anisotropic Pressure in Stellarators. // Proc. 9th Int. Workshop on Stellarators, Garching, Germany, 10-17 May 1993, p. 200-205.
2. Burdo O.S., Cheremnykh O.K., Omel'chenko A.Ya. A Structure of Flute Perturbations in Stellarators. // Proc. 9th Int. Workshop on Stellarators, Garching, Germany, 10-17 May 1993, p. 212-217.
3. Burdo O.S., Cheremnykh O.K., Pustovitov V.B., Revenchuk S.M. General-geometric dispersion relations for flute modes in toroidal magnetic traps. // Proc. Int. Conf. "Physics in Ukraine", Contr. Pap. Plasma Physics, 1993, p. 10-13.
4. Бурдо О.С., Демченко П.В., Омельченко А.Я., Ревенчук С.М., Черемних О.К. МГД-стійкість анізотропної плазми в стелараторі. // Український фізичний журнал, 1994, т. 39, № 4, с. 434-438.
5. Burdo O.S., Cheremnykh O.K., Revenchuk S.M., Pustovitov V.D. General geometric dispersion relations for toroidal plasma configurations.

- // Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, № 4, p. 641-656.
6. Cherennykh O.K., Revenchuk S.M., Omel'chenko A.Ya., Burdo O.S. Theory of Quasi-Flute Modes in Toroidal Plasma Configurations. // Physica Scripta, 1995, v. 51, № 2, p. 263-276.
7. Бурдо О.С., Каложний В.М., Немов В.В., Омельченко О.Я., Ревенчук С.М., Черемних О.К. Вплив скінченності ларморовського радіуса іонів на магнітогідродинамічну стійкість плазми в торсатроні "Ураган-2М". // Український фізичний журнал, 1995, т. 40, № 4, с. 317-323.
8. Burdo O.S., Cherennykh O.K., Revenchuk S.M., Omel'chenko A.Ya., Pustovitov V.D. Dispersion relations for quasi-flute modes in toroidal plasma configurations. // 22nd European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Bournemouth International Centre, UK, 3-7 July, 1995, p. 60.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Бейтман. МГД-неустойчивости. М., Энергоиздат, 1982. - 199 с.
2. Кухтенко О.І., Самоїленко Ю.І. Автоматичне керування плазмовими об'єктами. // Вісник АН УРСР, 1971, № 3, с. 44-52.
3. Самоїленко Ю.І., Губарев В.Ф., Кривонос Ю.Г. Управление быстропротескающими процессами в термоядерных установках. Киев, Наукова думка, 1988. - 384 с.
4. ITER Physics. ITER documentation series № 21. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1991. 302 p.
5. Волков Е.Д., Супруненко В.А., Шишкин А.А. Стелларатор. Киев, Наукова думка, 1983, 300 с.

Бурдо О.С. Теорія квазіжолобкових мод в тороїдних магнітних конфігураціях.

Дисертація у вигляді рукопису на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.08 - фізика і хімія плазми, Харківський державний Університет, Харків, 1996.

Захищається рукопис та вісім публікацій, які містять у собі теоретичні та практичні результати дослідження стійкості плазми в тороїдних магнітних конфігураціях відносно квазіжолобкових збурень. Отримані результати та розроблені чисельні алгоритми придатні для аналізу і розрахунків широкого класу тороїдних установок.

Burdo O.S. Theory of quasi-flute modes in toroidal magnetic configurations.

Dissertation as a manuscript for the candidate of physical and mathematical sciences scientific degree on a speciality 01.04.08 - the physics and chemistry of plasma, Kharkiv State University, Kharkiv, 1996.

The manuscript and eight publications are defended containing theoretical and practical results on research of the plasma stability concerning quasi-flute perturbations in a toroidal magnetic configurations. The received results and developed numerical algorithms can be used for the analysis and calculations of the wide class of the toroidal devices.

Ключові слова: плазма, магнітна гідродинаміка, дрібномасштабні МГД збурення, стійкість, шир, інкремент, дисперсійні співвідношення.

ЛНБ ім. В. Стефанишина
АН України

Бурдо О.С. Теория квазиполовых мод в тороидальных магнитных конфигурациях

// Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 611-630.

1. Burdo O.S. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. I

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 611-630.

2. Burdo O.S. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. II

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 631-650.

3. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. III

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 651-670.

4. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. IV

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 671-690.

5. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. V

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 691-710.

6. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. VI

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 711-730.

7. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. VII

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 731-750.

8. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. VIII

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 751-770.

9. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. IX

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 771-790.

10. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. X

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 791-810.

11. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. XI

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 811-830.

12. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. XII

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 831-850.

13. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. XIII

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 851-870.

14. Burdo O.S., Kuvshinov B.M., Pavlov E.B., Omelchenko O.D., Pustovarov A.V. Theory of quasi-poloidal modes in toroidal magnetic configurations. XIV

Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, v. 36, no. 4, p. 871-890.

Научн. изд. Общ. Тираж 80. Формат 60×84 1/4. Бумага для офсетной печати.
Печ. оф. Укр. н. д. Подансь в печ. 29.03.1996 г. Зак. 0485.

Издательство «Пресса України».

ИДБ 280

AB 34.605