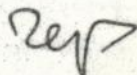


ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЧЕРЕМНЫХ Олег Константинович



УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАЗМЫ
В ТОРОИДАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ
ОТНОСИТЕЛЬНО КВАЗИЖЕЛОБКОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Специальность 01.04.08 - физика и химия плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Харьков - 1996



00760427 (Q)

"Институт ядерных исследо-

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент НАН
Украины
СТЕПАНОВ Константин Николаевич,
доктор физико-математических наук
ЗАГОРОДНИЙ Анатолий Глебович,
доктор физико-математических наук
ФИЛИППОВ Юрий Федорович.

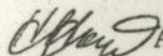
Ведущая организация : Киевский государственный университет
им. Т.Г.Шевченко.

Защита состоится "1" ноября 1996 г. в 15⁰⁰ 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 "26" сентября 1996 г.

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

 Азаренков Н.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

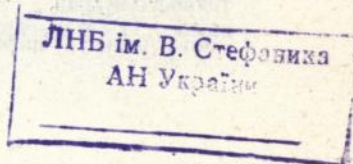
Тороидальные магнитные ловушки для удержания высокотемпературной плазмы являются наиболее перспективными и продвинутыми системами для решения проблемы управляемого термоядерного синтеза. Успешные эксперименты по получению термоядерной энергии из дейтериево-тритиевой плазмы на установках JET, TFTR и JT-60U делают токамаки лидерами среди магнитных систем по удержанию плазмы. Стеллараторы признаны основным альтернативным направлением. Токамаки и стеллараторы рассматриваются в качестве возможных прототипов термоядерных реакторов.

Эффекты нарушения равновесия и устойчивости плазмы ограничивают величину давления, определяющую экономическую эффективность термоядерного реактора на основе токамака или стелларатора.

Цель работы состоит в теоретическом исследовании физической природы квазижелобковых возмущений в тороидальных магнитных ловушках и изучении влияния этих возмущений на устойчивость плазмы, а также в выяснении особенностей взаимодействия высокоэнергетичных ионов с квазижелобковыми модами.

Научная новизна. Автором впервые получены следующие результаты:

- сформулирована и решена обобщенная задача Сайдема-Мерсье в тороидальной геометрии;
- дисперсионное уравнение и критерий устойчивости баллонных мод в плазме с произвольным профилем давления;



- критерий устойчивости компактного стелларатора с плоской круговой осью;
- предсказано существование кинетических баллонных мод в тороидальных ловушках;
- открыто возникновение области устойчивости в МГД неустойчивой области плазмы за счет взаимодействия запертых высокоэнергетических ионов с баллонными возмущениями;
- разработан метод укороченного функционала для решения дифференциальных уравнений второго порядка, которые возникают при исследовании устойчивости плазмы.

Научная и практическая ценность работы обусловлена возможностью использования полученных результатов для анализа устойчивости высокотемпературной плазмы в тороидальных магнитных ловушках для целей УТС. Наиболее важные из них:

- формулы для критического давления плазмы в токамаках и стеллараторах;
- общесоветические выражения для инкрементов квазижелобковых мод;
- вывод о том, что компактные стеллараторы с точки зрения устойчивости плазмы лучше, чем обычные стеллараторы;
- исследование устойчивости торсатрона "Ураган-2М" относительно мелкомасштабных возмущений с учетом эффекта конечности ларморовского радиуса ионов (КЛР);
- вывод о том, что продольный ток ухудшает устойчивость стелларатора относительно мелкомасштабных возмущений за счет реализации токового бугра;
- объяснение улучшения устойчивости плазмы в экспериментах с попе-

речной инжекцией частиц за счет взаимодействия быстрых захваченных ионов с баллонными модами;

- объяснение двух режимов генерации "fishbone" - колебаний при взаимодействии высокоэнергетичных ионов с баллонными модами;
- оценка спектра желобковой вихревой турбулентности.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Постановка и анализ обобщенной задачи Сайдема, в том числе в общегеометрической постановке, и приложение полученных результатов к исследованию устойчивости токамаков и стеллараторов.
2. Теория квазижелобковых мод в тороидальных магнитных ловушках.
3. Результаты исследований взаимодействия высокоэнергетичных ионов с квазижелобковыми модами.
4. Эффект генерации быстрыми запертыми ионами с области устойчивости в неустойчивой относительно баллонных мод плазме.
5. Метод укороченного функционала решения дифференциальных уравнений второго порядка.

Достоверность результатов. Обоснованность результатов диссертации обусловлена использованием общепринятых методов теоретической и математической физики и подтверждена согласием с численными расчетами, а также тем обстоятельством, что полученные физические результаты содержат результаты других авторов как частный случай. Ряд выводов диссертации получил экспериментальное подтверждение.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации были представлены и докладывались на Всесоюзных конференциях по физике плазмы и УТС, Всесо-

юзных семинарах по теории высокотемпературной плазмы, Совещании Технического Комитета МАГАТЭ "Альфа-частицы в термоядерных исследованиях", Советско-американском совещании по стеллараторам, Советско-германском совещании по стеллараторам, Всесоюзном семинаре по параметрической турбулентности и нелинейным явлениям в плазме, Европейских физических конференциях по УТС и физике плазмы, Международных симпозиумах МАГАТЭ по стеллараторам, Всесоюзной конференции по взаимодействию электромагнитных излучений с плазмой, Украинских конференциях по УТС и физике плазмы, Международной конференции "Физика в Украине".

Публикации. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 27 печатных работах. Их список приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Работа изложена на 216 страницах машинописного текста, содержит 26 рисунков и 158 наименований цитируемой литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, дан исторический обзор и сформулированы цели и задачи проведенных автором исследований, связанных с проблемой устойчивости плазмы в тороидальных магнитных ловушках относительно квазижелезобковых возмущений. Описана структура диссертации и определено ее место среди других работ по этой тематике.

В Главе 1 исследована обобщенная задача Сайдема для тороидальных магнитных ловушек .

В §1.1 математически корректно сформулирована и решена обобщенная задача Сайдема . Показано, что классическая задача Сайдема о стабилизации широм неустойчивости плазмы в магнитном поле и поле тяжести , задача об устойчивости токамака и стелларатора относительно желобковых возмущений и задача о дисперсии глобальных альфвеновских мод (ГАМ) с большими поперечными волновыми числами в математическом смысле сводятся к одномерному стационарному уравнению Шредингера

$$\frac{d^2 \psi}{dz^2} + [E - U(z)] \psi = 0 \quad (1)$$

с потенциалом

$$U(z) = \Gamma^2 ch^2 z + (2ch z)^{-2} \quad (2)$$

и энергии

$$E = G - 1/4 \quad (3)$$

Величины G и Γ в (2) и (3) обычно определяют магнитную яму установки и инкремент неустойчивости. С помощью этого уравнения проведен полный спектральный анализ задачи . Установлено , что энергетический спектр этого уравнения хорошо описывается методом возмущений и квазиклассическим приближением , что позволяет исправить полученные ранее неточные результаты и дает возможность выписать выражения для инкрементов неустойчивости желобковых возмущений в токамаке и стеллараторе , а также для спектра ГАМ . Сопоставление аналитических дисперсионных выражений с результатами численного решения исходного уравнения позволило определить области применимости этих выражений . Получены выражения для максимальных значений инкрементов желобковых мод в токамаке и стеллараторе .

Фактически предложен новый подход к исследованию задачи Сайдема . Этот подход позволяет значительно упростить процедуру получения конечных результатов и дать физически наглядную картину спектра упомянутых физических задач .

В §1.2 получены общегеометрические дисперсионные соотношения для квазижелобковых мод в произвольных тороидальных плазменных конфигурациях с малым давлением . Приведены соображения в пользу расширения полученных в §1.1 результатов на произвольные тороидальные магнитные ловушки . Для таких ловушек в произвольной системе координат с использованием только общих свойств дифференциальных операторов, входящих в уравнения магнитной гидродинамики, получено общегеометрическое уравнение малых колебаний , справедливое для квазижелобковых возмущений в плазме с малым давлением и широм . Это уравнение приведено к виду стационарного уравнения Шредингера, тождественному уравнению Шредингера из §1.1 . Коэффициенты G и Γ этого уравнения являются средними от равновесных параметров плазмы и магнитного поля . Показано , что условие отсутствия дискретного спектра собственных значений уравнения Шредингера совпадает с общегеометрическим критерием устойчивости Мерсье . С помощью результатов §1.1 получены общегеометрические дисперсионные соотношения , определяющие инкременты квазижелобковых возмущений в произвольной тороидальной магнитной ловушке .

В §1.3 исследовано влияние конечности ларморовского радиуса ионов на устойчивость плазмы малого давления относительно возмущений Сайдема - Мерсье . Развита общегеометрический подход , сочетающий аналитические вычисления и численные решения . Показано , что при учете КЛР неустойчивость квазижелобковых возмущений приобретает

пороговый характер . Неустойчивость имеет место, если справедливо неравенство

$$k_y \rho_l < \frac{2^{7/2}}{e^2} \sqrt{\frac{1+T}{\beta}} \langle S \rangle \varepsilon_p \left(G - \frac{1}{4} \right) \exp \left\{ \frac{\pi - \frac{\pi}{2} \exp \left[-\pi \left(\frac{1}{2} - \sqrt{G - \frac{1}{4}} \right) \right]}{2 \sqrt{G - \frac{1}{4}}} \right\}, \quad (4)$$

где ρ_l - ларморовский радиус ионов , $k_y = m/a$, $T = T_i/T_e$ - отношение ионной температуры к электронной и $\varepsilon_p^{-1} = -Rd(\ln p)/da$:

Сформулирован общегеометрический критерий устойчивости бесшировых торондальных ловушек относительно желобковых возмущений с учетом КЛР .

Полученные результаты нашли применение при исследовании влияния КЛР на МГД устойчивость плазмы относительно мод Мерсье в тороидальном "Ураган-2М" . На основе численного счета показано , что зоны неустойчивости плазмы существенно сокращаются под влиянием эффекта КЛР .

В §1.4 исследована устойчивость плазмы малого давления в торондальных магнитных бестоковых ловушках . Получен общегеометрический критерий устойчивости таких ловушек относительно мод Мерсье . Показано , что этот критерий отличается от ранее полученных критериев более корректным выражением для магнитной ямы . С помощью полученного критерия проанализирована устойчивость стелларатора с плоской круговой осью и круглыми " в среднем " магнитными поверхностями . Для рассматриваемой модели стелларатора критерий устойчивости , записанный в общепринятых физических терминах , имеет вид

$$\frac{\mu'^2}{4} - \frac{2P'}{aB_z^2} \left[1 + \mu^2 (1+S) - \frac{RB_z^2 V_0''}{2} - \frac{a\mu_v'' + 3\mu_v' R\Lambda}{2\mu} \frac{R\Lambda}{a} \right] > 0 \quad (5)$$

Показано, что компактные стеллараторы (типа "Ураган-2М") с точки зрения устойчивости плазмы лучше, чем обычные стеллараторы. Полученные результаты обобщены на случай стеллараторов с продольным током и анизотропной функцией распределения частиц. Продольный ток приводит к реализации токового магнитного бутра, ухудшающего устойчивость плазмы.

В §1.5 исследована проблема равновесия и устойчивости плазмы с параллельным течением в магнитных ловушках.

Рассмотрена система нелинейных векторных МГД уравнений, описывающая параллельное течение плазмы в магнитных ловушках. Изложена последовательная процедура сведения этих уравнений для токонесящей плазмы, помещенной в сильное продольное магнитное поле, к скалярным уравнениям в частных производных. Показано, что полученная система представляет собой, по существу, комбинацию уравнений Грэда - Шафранова и Страусса. Показано, что решение этих уравнений описывает равновесие плазмы с магнитными островами и с вложенными магнитными поверхностями. Полученное решение обобщено на случай неидеальной плазмы. Найдены также точные решения хорошо известных редуцированных МГД уравнений Кадомцева-Погуде с учетом диффузии магнитного поля и кинематической вязкости, описывающих тороидальное равновесие.

Рассмотрено влияние стационарного параллельного течения на равновесие плазмы в осесимметричном токамаке. Получено нелинейное уравнение в частных производных, описывающее такое равновесие в рамках модели Шафранова для токамака с круглыми магнитными поверхностями, навитыми вокруг одной магнитной оси. Методом разложения по тороидальности получены уравнения, описывающие равновесие плазмы по малому и большому радиусу тора. Установлено, что

магнитные поверхности смещаются наружу от магнитной оси и образуют среднюю магнитную яму, стабилизирующую мелкомасштабные возмущения.

Показано, что предположение о поперечной мелкомасштабности возмущений и их вытянутости вдоль силовых линий магнитного поля (и поля скоростей) позволяет существенно упростить гидромагнитные уравнения и получить относительно простое уравнение малых колебаний для квазигелобковых мод. От ранее известных уравнений малых колебаний полученное уравнение отличается перенормировкой давления за счет скорости. С помощью уравнения малых колебаний получен аналитический критерий устойчивости, который существенным образом зависит от полоидальной скорости плазмы v_θ . В случае $v_\theta = 0$ критерий переходит в ранее полученный критерий Мерсье для рассматриваемой модели токамака.

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

В §2.1 получено обобщенное дисперсионное уравнение для баллонных мод в тороидальных магнитных ловушках и аналитический критерий устойчивости этих мод для плазмы с произвольным профилем давления, которые обобщают и уточняют практически все известные в этой области результаты. Полученное дисперсионное уравнение позволило снять ряд противоречий в теории баллонных мод. В частном случае параболического профиля давления оно имеет компактный вид

$$\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{1+2s} = C_B \left(\sigma - s - 1 - \frac{s\gamma^2}{2(s^2 - 1/4)} \right), \quad (6)$$

$$s = (1/4 - G)^{1/2} - 1/2,$$

$$C_B = \frac{(1/2 + s)\Gamma^3(1/2 + s)\cos\pi s}{2\pi^{1/2}\Gamma(1 + s)},$$

где γ - инкремент, нормированный на шировую альфвеновскую частоту, а σ^2 - "баллонный" коэффициент, выражающийся через параметры плазмы и установки. Для получения этого уравнения предложен новый математический метод решения дифференциальных уравнений второго порядка - метод укороченного функционала.

В §2.2 получен аналитический критерий устойчивости баллонных мод в токамаке с конечным давлением. Показано, что при $\beta_0 \sim 1$ существует порог по давлению плазмы, при превышении которого имеет место эффект самостабилизации. Одновременно при таких давлениях реализуется дестабилизирующий баллонный эффект, обусловленный перекрытием возмущений, развивающихся на соседних магнитных поверхностях. Конкуренция этих эффектов определяет возможность реализации второй зоны устойчивости баллонных мод. С ростом давления эффект самостабилизации становится главным и приводит к реализации второй зоны устойчивости. В пределе $\beta_0 \gg 1$ полученный критерий устойчивости переходит в ранее полученные критерии (с незначительными уточнениями последних). Критерий учитывает эффект самостабилизации плазмы в приосевой области шнура.

В §§2.3-2.4 развита аналитическая теория устойчивости плазмы в тороидальных магнитных ловушках с широм относительно квазижелобковых возмущений. Эта теория включает в себя следующие элементы:

а) Выведено уравнение малых колебаний, описывающее квазижелобковые возмущения в тороидальных магнитных ловушках. Показано, что это уравнение может быть сведено к виду одномерного "дистил-

лированного " баллонного уравнения для фурье-образа радиального смещения элемента объема плазмы , в котором роль баллонной переменной играет отношение радиальной и поперечной составляющих волнового вектора возмущения . Это уравнение впервые получено в приближении $\beta_0 \sim 1$ и предположении , что профиль давления имеет параболическую форму , и описывает возмущение с произвольным отношением радиальной и поперечной составляющих волнового вектора .

Показано , что баллонное представление для квазижелобковых мод в окрестности резонансной магнитной поверхности сводится к преобразованию Фурье . Отмечается , что рассмотренные в Главе 1 и в §§2.1 и 2.2 возмущения являются частными случаями квазижелобковых возмущений .

б) Для исследования условий возбуждения квазижелобковых мод и нахождения их дисперсионных соотношений " дистиллированное " баллонное уравнение сведено к виду стационарного уравнения Шредингера (1) с энергией (3) и потенциалом

$$U(z) = \Gamma^2 ch^2 z + \left(\frac{1}{4} - \sigma^2 \right) / ch^2 z \quad (7)$$

Из общих свойств этого уравнения установлено необходимое условие устойчивости плазмы относительно квазижелобковых возмущений .

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

г) Для обоих режимов возбуждения квазиглобальных мод выведены аналитические дисперсионные соотношения, которые удовлетворительно аппроксимируют результаты численного решения "дистиллированного" баллонного уравнения. Кратко обсужден случай непараболического профиля давления.

В §2.5 исследовано влияние конечности ларморовского радиуса ионов на устойчивость плазмы большого давления относительно квазиглобальных возмущений. Показано, что при учете эффекта КЛР спектр квазиглобальных возмущений состоит из двух чисто осциллирующих веток и из нарастающей и затухающей веток. Приведены аналитические выражения для частот и инкрементов / декрементов этих веток. Здесь же получен аналитический критерий устойчивости баллонных мод с учетом стабилизирующего эффекта КЛР.

В Главе 3 исследуется влияние высокоэнергетичных частиц на квазиглобальные моды в токамаках и стеллараторах.

В §3.1 в приближении слабых столкновений получено уравнение малых колебаний для квазиглобальных мод в плазме с пролетными и тороидально запертыми высокоэнергетичными частицами и соответствующее дисперсионное уравнение. Показано, что собственные частоты колебаний не превышают ионную дрейфовую частоту. Рассмотрены условия, при которых быстрые частицы могут взаимодействовать с собственными колебаниями.

В §3.2 исследовано влияние высокоэнергетичных частиц на моды Сайдема-Мерье в токамаках и стеллараторах. Показано, что быстрые частицы раскачивают ветвь собственных колебаний с частотой порядка ω_* и приводят к затуханию колебаний с частотой $\gamma_{MHD}^2 / \omega_*$, где ω_* - ионная дрейфовая частота, γ_{MHD} - инкремент идеальной МГД моды,

то есть могут реализовать кинетическую моду Сайдема - Мерсье . Показано , что наличие быстрых частиц приводит к модификации собственных колебаний и снятию вырождения с соответствующих инкрементов и частот . Установлено , что запертые быстрые частицы , в отличие от пролетных , расширяют область устойчивости плазмы , на границе которой реализуется кинетическая мода с инкрементом , значительно меньшим магнитогидродинамического . Показано , что в токамаке и стеллараторе процессы взаимодействия быстрых пролетных и тороидально запертых ионов с модами Сайдема - Мерсье качественно подобны друг другу .

В §3.3 изучено влияние высокоэнергетичных ионов на баллонные моды . Показано , что появление в плазме быстрых пролетных частиц , как и в случае мод Сайдема-Мерсье , приводит к реализации кинетического аналога баллонных мод на пролетных частицах . Что касается взаимодействия запертых высокоэнергетичных частиц с баллонными модами , то показано , что помимо возбуждения кинетического аналога колебаний баллонных мод с частотами $\omega < \omega_*$, существует возможность генерации запертыми частицами вынужденных колебаний с частотами $\omega > \omega_*$ и появления устойчивого состояния в ранее МГД неустойчивой области . Установлено , что при конечной плотности быстрых запертых частиц в области баллонной неустойчивости плазмы может возникать " окно " устойчивости , что приводит к предельным по устойчивости давлениям , значительно превышающим те , что предсказываются идеальной МГД теорией . Это говорит о том , что запертые высокоэнергетичные частицы могут эффективно стабилизировать неустойчивые баллонные моды . Вблизи границы " окна " устойчивости могут раскачиваться неустойчивые ветки колебаний с ионной дрейфовой частотой и средней частотой магнитного дрейфа , которые могут приводить к " fish-

bone " - колебаниям .

В §3.4 рассмотрена нелинейная теория квазижелобковых возмущений в плазме с высокоэнергетическими ионами . Изложена последовательная процедура получения модельной системы уравнений для токонесущей плазмы , которая описывает как линейные , так и нелинейные свойства квазижелобковых мод в плазме с компонентой горячих частиц . Показано , что в линейном приближении и в пренебрежении быстрыми частицами полученная система сводится к дисперсионному уравнению , описывающему известные возмущения желобкового типа в плазме .

В §3.5 исследовано влияние высокоэнергетичных частиц на квазижелобковые вихри в плазме . Из полученной в §3.4 системы уравнений найдены стационарные решения в форме дипольных вихрей в плазме с " горячими " частицами . 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 . В этом состоит качественное отличие найденных решений от хорошо известных солитонных решений уравнения Кортевега - де Фриза , нелинейного уравнения Шредингера и др . Показано , что наличие " горячей " компоненты плазмы приводит к изменению области существования вихревых решений в пространстве скоростей . Даже в линейно устойчивой плазме квазижелобковые возмущения могут давать существенный вклад в аномальный перенос тепла и частиц посредством вихревой конвекции .

Рассмотрена квазижелобковая турбулентность в плазме как ансамбль квазижелобковых вихрей . С помощью статистического подхода оценен спектр двумерной вихревой турбулентности и обусловленный ею коэффициент диффузии частиц .

В заключении кратко изложены основные результаты диссертации и положения, выносимые автором на защиту.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ :

1. Cheremnykh O.K., Revenchuk S.M. Dispersion Relations for Suydam Problem. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 1992, V. 34, p. 55-75.
2. 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.
3. Cheremnykh 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.
4. Бойко А.Я., Черемных О.К. О влиянии высокоэнергетичных частиц на баллонные желобковые моды в токамаке. // Физика плазмы, 1988, Т. 14, № 8, с. 929-937.
5. Cheremnykh O.K. Dispersion equation and stability limit for ballooning flute modes in a tokamak with circular magnetic surfaces and an arbitrary pressure profile. // Nuclear Fusion, 1989, V. 29, p. 1899-1905.
6. Andrushchenko Zh.N., Bojko A.Ya., Cheremnykh O.K. Interaction of trapped superthermal particles with ballooning flute modes in a tokamak with circular magnetic surfaces. // Nucl. Fusion, 1990, V. 30, № 10, p. 2097-2110.
7. Andrushchenko Zh.N., Bojko A.Ya., Cheremnykh O.K. Alpha-particle effects on ballooning flute modes in tokamaks. // Fusion Technology, 1990, V. 18, № 3, p. 475-486.
8. Cheremnykh O.K., Podnebesnyi A.V., Pustovitov V.D. Mercier stability

- criterion for currentless toroidal systems. // Nuclear Fusion, 1991, V. 31, № 9, p. 1747-1750.
9. Андрущенко Ж.Н., Омельченко А.Я., Черемных О.К. Влияние быстрых частиц на желобковые моды в стеллараторе. // Физика плазмы, 1995, Т. 21, № 4, с. 316-326.
 10. Черемных О.К. К вопросу об устойчивости баллонных желобковых мод в токамаке с конечным давлением и малым широм. // Физика плазмы, 1987, Т. 13, № 11, с. 890-892.
 11. Бурдо О.С., Каложний В.М., Нсмов В.В., Омельченко О.Я., Ревенчук С.М., Черемних О.К. Вплив шкінченності ларморівського радіуса іонів на магнітогідродинамічну стійкість плазми в торсатроні "Ураган-2М". // Український фізичний журнал, 1995, т. 40, № 4, с. 317-323.
 12. Бурдо О.С., Демченко П.В., Омельченко О.Я., Ревенчук С.М., Черемних О.К. МГД-стійкість анізотропної плазми в стеллараторі. // Український фізичний журнал, 1994, т. 39, № 4, с. 434-438.
 13. Андрущенко Ж.Н., Павленко В.П., Черемных О.К. Желобковые вихри в плазме с горячими частицами. // Физика плазмы, 1992, Т. 18, № 1, с. 47-53.
 14. Андрущенко Ж.Н., Ревенчук С.М., Черемных О.К. Стационарные МГД течения в цилиндрическом плазменном шнуре. // Физика плазмы, 1993, Т. 19, № 2, с. 241-251.
 15. Cheremnykh O.K., Andrushchenko Zh.N., Edenstrasser J.W., Taranov V.V. Relaxation of non-ideal magnetohydrodynamic plasma in a cylindrical column. // Physics Plasmas, 1994, V. 1, № 8, p. 2525-2530.
 16. Cheremnykh O.K. On a question about plasma equilibrium and stability in tokamak with flow. // Physica Scripta, 1996, v. 52, p.712-713.
 17. Cheremnykh O.K., Podnebesnyi A.V., Pustovitov V.D. Mercier criterion

- for stellarator with planar circular axis. // 18th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Berlin, Germany, 3-7 June, 1991, V. 15c, part II, p. 109-112.
18. Cheremnykh O.K., Revenchuk S.M. Dispersion relations for Suydam problem in stellarator. // 8 Stellarator Workshop, Kharkov, 27-31 May, 1991. Vienna: IAEA, 1991, p. 287-290.
19. Cheremnykh O.K. A criterion of ballooning flute mode stability in stellarator. // 8 Stellarator Workshop, Kharkov, 27-31 May, 1991. Vienna: IAEA, 1991, p. 279-282.
20. Cheremnykh O.K., Revenchuk S.M. Dispersion relations for global alven modes with $m \gg 1$. // 18th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Berlin, Germany, 3-7 June, 1991, V. 15c, part IV, p. 93-96.
21. 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.
22. Andrushchenko Zh.N., Cheremnykh O.K., Omel'chenko A.Ya. The influence of fast particles on flute modes in stellarators. // Proc. 9th Int. Workshop on Stellarators, Garching, Germany, 10-17 May 1993, p. 206-211.
23. Андрущенко Ж.Н., Павленко В.П., Черемных О.К. Спектр желобковой вихревой турбулентности. // Матер. 6-ой Всесоюзной конференции по взаимодействию электромагнитного излучения с плазмой. Душанбе. 1991, с. 55.
24. 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.

25. Андрущенко Ж.Н., Омельченко А.Я., Черемных О.К. О взаимодействии горячих ионов с желобковыми модами в стеллараторе.
// Препринт ХФТИ 93-6, Харьков, 1993, 21 с.
26. 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.
27. Andrushchenko Zh.N., Cheremnykh O.K., Edenstrasser J.W. Effects of flow on the plasma equilibrium in axisymmetric toroidal magnetic traps. // 22nd European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. Abstracts of Invited and Contributed Papers. Bournemouth Int. Centre, UK, 3-7 July 1995, p. 336.

Черемних О.К. Стійкість плазми в тороїдальних магнітних пастках відносно квазіжолобкових збурень.

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

Захищається рукопис та двадцять сім публікацій, які містять у собі теоретичні та практичні результати дослідження стійкості плазми відносно квазіжолобкових збурень в тороїдальних магнітних пастках, а також вплив високоенергетичних іонів на квазіжолобкові моди.

Отримані результати придатні для аналізу і розрахунків широкого класу тороїдальних установок.

Cheremnykh O.K. Plasma stability in toroidal magnetic traps relative to quasi-flute perturbations.

Dissertation as a manuscript for the doctor 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 twenty seven publications are defended containing theoretical and practical results on research of the plasma stability concerning quasi-flute perturbations in toroidal magnetic traps and investigation of high energy particle effect on the quasi-flute modes.

The received results can be used for the analysis and calculations of the wide class of toroidal devices.

Ключові слова: плазма, магнітна гідродинаміка, дрібномасштабні МГД збурення, стійкість, дисперсійні співвідношення, високоенергетичні іони.

ЧЕРЕМНЫХ Олег Константинович

**УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАЗМЫ В ТОРОИДАЛЬНЫХ
МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ ОТНОСИТЕЛЬНО
КВАЗИЖЕЛОВКОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико - математических наук

Подписано к печати 11.09.96

Формат 60x84/16.

Печать офсетная

1,375 усл.печл. Тираж 100 экз. Заказ № 35

СКТБ с ЭП Научного центра " Институт ядерных исследований "

252028 , Киев - 28 , проспкт Науки , 47.

U39177

AB 35.639