

Харьковский государственный университет

На правах рукописи

НЕМОВ Виктор Вадимович

*Немов*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ  
В СТЕЛЛАТОРАХ

Специальность 01.04.08 – физика и химия плазмы

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Харьков-1993

4628938

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в ННЦ "Харьковский физико-технический институт".

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН  
Шафранов Виталий Дмитриевич  
(Российский научный центр "Курчатовский институт", г. Москва)

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кондратенко Анатолий Николаевич  
(Харьковский государственный университет,  
г. Харьков)

доктор физико-математических наук  
Кузнецов Юрий Константинович  
(Национальный научный центр "Харьковский  
физико-технический институт", г. Харьков)

Ведущая организация: Институт ядерных исследований АН Украины,  
г. Киев

Защита состоится *"14" января* 1994 г. в *15<sup>00</sup>* час. на  
заседании специализированного совета Д 053.06.01 при Харьковском  
государственном университете по адресу: 310108, г. Харьков,  
пр. Курчатова, 31, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной  
библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан *"29" ноября* 1993 г.

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00802827 (R)

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор физ.-мат. наук

*Сазаренко*

Н.А. Азаренков

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Программа стеллараторных исследований является важной частью направления исследований по тороидальному удержанию горячей плазмы в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза. Многие явления, связанные с равновесием, устойчивостью плазмы и процессами переноса в ней, являются определяющими для удержания плазмы в системах стеллараторного типа. Необходимость совершенствования стеллараторных систем и поиск их оптимальных вариантов постоянно требуют дальнейшего изучения таких явлений.

В число эффектов, оказывающих существенное влияние на удержание плазмы в стеллараторах, входят, в частности, неклассическая диффузия частиц и тепла и эффекты, связанные с плазменными токами равновесия, обусловленными градиентом давления плазмы.

Магнитное поле плазменных токов равновесия влияет на магнитную конфигурацию стеллараторов, этими токами определяются потери частиц и тепла в режиме сильно столкновительной плазмы, они могут существенно влиять на развитие ряда неустойчивостей плазмы. Эффекты, связанные с плазменными токами равновесия в значительной мере определяются свойствами удерживающего магнитного поля и требуют при их анализе учета трехмерного характера неоднородности реального магнитного поля стеллараторов. Эти эффекты в настоящее время широко исследуются, однако соответствующие указанному требованию теоретические методы исследования пока еще полностью не развиты.

Предсказываемый теорией неклассической диффузии эффект увеличения в тороидальных магнитных ловушках коэффициентов переноса в области малых частот соударений частиц в стеллараторах может проявляться особенно сильно. Этот эффект в значительной мере определяется геометрией удерживающего магнитного поля. Методы его исследования также требуют развития.

В связи со значительной ролью в удержании плазмы магнитного поля стеллараторных систем и появлению их новых схем соответствующего изучения требуют и сами магнитные поля таких систем.

Выполненные в предлагаемой диссертации теоретические исследования посвящены изучению перечисленных вопросов, чем и определяется ее актуальность.

Целью настоящей работы является изучение плазменных токов равновесия, обусловленных градиентом давления плазмы, связанных с этими токами характеристик удержания плазмы и неоклассической диффузии в зависимости от геометрии и распределения реального магнитного поля в стеллараторах. При этом значительное внимание уделяется разработке новых методов исследования этих явлений.

К числу основных вопросов, которые были поставлены и решены в ходе выполненных исследований, относятся следующие вопросы:

- разработка методов расчета ряда характеристик удержания плазмы, тесно связанных с градиентом давления плазмы и плазменными токами равновесия, в известном трехмерно-неоднородном стеллараторном магнитном поле сложной структуры;
- разработка метода исследования неоклассической диффузии в стеллараторах с произвольной геометрией магнитного поля;
- исследование плазменных токов равновесия и параметров оптимизации, определяемых этими токами, в ряде конкретных магнитных конфигураций стеллараторного типа, для которых магнитные поверхности могут быть рассчитаны только численными методами;
- исследование диффузии Пфирша-Шлютера и критерия МГД устойчивости Мерсье в тороидальном трехмерно-неоднородном магнитном поле с применением разработанных методов расчета;
- исследование неоклассической диффузии в стеллараторных системах с винтовой магнитной осью в области малых частот соударений частиц;
- анализ явлений, приводящих к уменьшению неоклассических потерь частиц и энергии в стеллараторных системах;
- вывод удобных выражений для описания магнитного поля торсатронов с учетом особенностей их винтовых обмоток;
- исследование условий образования островной структуры магнитных поверхностей в центральной области магнитных конфигураций  $\ell=3$  стеллараторов и торсатронов.

Научная новизна. Впервые получены следующие результаты:

Получены формулы для компонентов магнитного поля стеллараторов и торсатронов в виде разложений по степеням тороидальности и расстояния от круговой оси тора с учетом модуляции угла навивки винтовых проводников.

Получены условия образования островной структуры магнитных поверхностей в центральной области магнитных конфигураций  $\ell=3$  торсатронов в зависимости от соотношений винтового, продольного и поперечного магнитных полей и параметров закона навивки.

Использовано описание аксиально-симметричной составляющей полоидального магнитного поля торсатронов в виде разложений векторного потенциала по тороидальным гармоникам с присоединенными функциями Лежандра в тороидальной системе координат. Получены формулы коэффициентов разложения в ряд для различных законов навивки винтовой обмотки.

Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений позволяющая рассчитывать распределение на магнитных поверхностях компонентов градиента функции магнитных поверхностей  $\nabla\Phi$  в известном трехмерно-неоднородном тороидальном магнитном поле.

Получены уравнения, позволяющие путем интегрирования вдоль силовых магнитных линий в заданном трехмерно-неоднородном тороидальном магнитном поле рассчитывать ряд связанных с  $\nabla\Phi$  характеристик удержания плазмы (в том числе коэффициенты диффузии в режиме Пфирша-Шлютера для примесных ионов и критерий МГД устойчивости Мерсье).

Выполнено численно исследование плазменных токов равновесия в магнитной конфигурации одного из вариантов ловушек типа ДРАКОН, в которых ранее эти токи исследовались только аналитически.

Численными методами исследованы плазменные токи равновесия и связанные с ними параметры оптимизации в магнитных конфигурациях  $\ell=2$  и  $\ell=3$  торсатронов с параметрами, близкими к параметрам установок "Ураган-2М" и "Ураган-3", в зависимости от величины однородного вертикального магнитного поля, дополнительного к основному полю торсатронов.

Показано, что в режиме Пфирша-Шлютера геометрический фактор увеличения диффузии примесных ионов в сложной геометрии стеллараторного магнитного поля определяется отношением усредненных по объему магнитного слоя квадратов продольного и поперечного магнитному полю токов равновесия подобно тому, как это имеет место для диффузии частиц и тепла в столкновительной плазме без примесей.

Численными методами выполнено исследование критерия устойчивости Мерсье для плазмы малого газокINETического давления, но с

конечным локальным градиентом давления, в  $\ell=2$  торсатроне с параметрами, близкими к параметрам торсатрона "Ураган-2М".

Предложен подход к исследованию неклассической диффузии в стеллараторах со сложной геометрией магнитного поля, в котором учет роли геометрии магнитного поля в банановом кинетическом уравнении осуществляется через продольный инвариант движения запертых частиц. Получено соответствующее банановое кинетическое уравнение и формулы для потоков частиц и энергии.

Выполнено исследование неклассической диффузии, обусловленной дрейфом бананов поперек магнитных поверхностей, в ловушках стеллараторного типа с винтовой магнитной осью.

Обнаружен эффект запаздывания релаксации функции распределения пролетных частиц в стеллараторах в области редких соударений частиц, который может влиять на неклассическую диффузию в стеллараторах.

Научная и практическая значимость. Полученные формулы компонентов магнитного поля стеллараторов и торсатронов могут использоваться для аналитических расчетов различных явлений на достаточно малых расстояниях от магнитной оси.

Полученные условия образования островных магнитных поверхностей в центральной области магнитных конфигураций  $\ell=3$  торсатронов могут использоваться при выборе оптимальных соотношений между параметрами таких систем.

Использованное описание аксиально-симметричной составляющей полоидального магнитного поля торсатронов в виде разложений векторного потенциала по тороидальным гармоническим функциям в сочетании с описанием тороидального винтового поля применимо при произвольных расстояниях от магнитной оси и позволяет при расчетах на ЭВМ существенно сократить затраты машинного времени.

Предложенный метод расчета в заданном трехмерно-неоднородном тороидальном магнитном поле распределения вдоль магнитных поверхностей градиента функции магнитных поверхностей  $\psi$  позволяет с применением интегрирования вдоль силовых магнитных линий исследовать плазменные токи равновесия, устойчивость и удержание плазмы в ловушках стеллараторного типа в тех случаях, когда магнитные поверхности определяются только численными методами.

Результаты численного исследования плазменных токов равновесия, связанных с ними параметров оптимизации и критерия МГД устойчивости Мерсье в рассмотренных стеллараторных системах могут использоваться при анализе возможностей оптимизации таких систем.

Полученное банановое кинетическое уравнение, в котором учет роли геометрии магнитного поля осуществляется через продольный инвариант движения запертых частиц, может быть использовано для исследований неоклассических потоков частиц и тепла в стеллараторах с произвольной геометрией магнитного поля.

Исследование неоклассической диффузии в системах стеллараторного типа с винтовой магнитной осью показало возможность уменьшения коэффициентов неоклассического переноса путем определенного выбора параметров магнитного поля.

Обнаруженный эффект запаздывания релаксации функции распределения пролетных частиц при малой частоте их соударений может быть причиной уменьшения потоков частиц и тепла в стеллараторах в области редких соударений частиц по сравнению с их величиной, предсказываемой теорией неоклассической диффузии.

Автор выносит на защиту следующие результаты.

1. Формулы компонентов магнитного поля торсатронов для аналитического исследования различных явлений на достаточно малых расстояниях от круговой оси тора, полученные с учетом особенностей винтовых обмоток торсатронов.

2. Описание аксиально-симметричной составляющей полоидально-го магнитного поля торсатронов в виде разложения векторного потенциала в ряд по тороидальным гармоникам в тороидальной системе координат и формулы коэффициентов разложения в этот ряд.

3. Результаты аналитического исследования центральной области магнитной конфигурации  $\ell=3$  торсатрона с полученными условиями образования островных магнитных поверхностей в зависимости от соотношений винтового, продольного и поперечного магнитных полей и параметров закона навивки винтовой обмотки.

4. Систему обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющую рассчитывать путем интегрирования вдоль силовой магнитной линии в известном трехмерно-неоднородном тороидальном магнитном поле распределение  $\psi$  по магнитной поверхности, образуемой указанной линией.

5. Системы обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющие рассчитывать в заданном трехмерно-неоднородном тороидальном магнитном поле путем интегрирования вдоль силовых магнитных линий различные связанные с  $\psi$  характеристики удержания: плазменные токи равновесия, параметры оптимизации стеллараторов, определяемые этими токами, различные характеристики удержания, определяемые интегралами по объему магнитного слоя (в том числе коэффициенты диффузии в режиме Пфирша - Шлютера для примесных ионов и критерий МГД устойчивости Мерсье).

6. Результаты численного исследования плазменных токов равновесия в магнитных конфигурациях  $\ell=2$  и  $\ell=3$  торсатронов и в ловушке типа "Дракон". С применением разработанных методов в  $\ell=2$  и  $\ell=3$  торсатронах исследована зависимость параметров оптимизации, определяемых плазменными токами, от величины вертикального магнитного поля, дополнительного к основному полю торсатрона. Исследование, выполненное для одного из рассматривавшихся ранее вариантов ловушки "Дракон", позволило проанализировать возможную роль длины прямолинейных участков, величины пробочного отношения и гофрировки магнитного поля в наличии токов на прямолинейных участках.

7. Результаты исследования процессов переноса в чистой плазме и в плазме с примесями в режиме Пфирша-Шлютера в трехмерно-неоднородном стеллараторном магнитном поле с определением, в частности, зависимости геометрического фактора увеличения диффузии примесных ионов от геометрии стеллараторного магнитного поля.

8. Метод исследования критерия МГД устойчивости плазмы Мерсье в стеллараторном магнитном поле с применением разработанных методов вычисления  $\psi$  и плазменных токов равновесия.

9. Банановое кинетическое уравнение для исследования неоклассических потоков частиц и тепла в стеллараторах с произвольной геометрией магнитного поля, в котором роль геометрии магнитного поля учитывается через продольный инвариант движения запертых частиц.

10. Результаты исследования неоклассической диффузии в стеллараторах с винтовой магнитной осью, позволившего установить особенности диффузии и возможности уменьшения коэффициентов переноса в таких системах.

11. Результаты исследования влияния запаздывания релаксации функции распределения пролетных частиц на неоклассическую диффузию в стеллараторах при редких соударениях частиц.

Достоверность результатов. Обоснованность результатов и выводов диссертации обеспечена соответствием постановки задачи физической картине изучаемых явлений, корректным применением методов теоретической и математической физики, совпадением результатов, получаемых предложенными методами в случае простых моделей магнитного поля, с уже известными для этих моделей результатами.

Апробация работы.

Основные результаты исследований докладывались на 16-й и 17-й Европейских конференциях по УТС и физике плазмы (Вена, 1989; Амстердам, 1990); на Всесоюзных конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород, 1981, 1983, 1984, 1987, 1990, 1992); на 1-й Украинской конференции по УТС и физике плазмы (Киев, ноябрь 1992); на Всесоюзном семинаре по теории магнитного удержания высокотемпературной плазмы (Москва, ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1987, 1991); на 8-м Международном стеллараторном рабочем совещании (Харьков, 1991).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения с основными выводами, Приложения и списка цитированной литературы. Материал диссертации изложен на 216 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков, 8 таблиц. Список литературы содержит 143 наименования (включая работы автора).

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация посвящена теоретическому исследованию плазменных токов равновесия, МГД устойчивости плазмы и процессов переноса в системах стеллараторного типа, выполненному с учетом роли реального магнитного поля конкретных ловушек. С целью анализа роли реального магнитного поля стеллараторов в диссертации предложены

два новых метода исследования: 1) метод расчета градиента функции магнитных поверхностей  $\nabla\Phi$  с помощью интегрирования вдоль силовых магнитных линий; 2) метод бананового кинетического уравнения для общей геометрии магнитного поля, обобщающий банановое кинетическое уравнение Галеева-Сагдеева, полученное ранее для стеллараторов с плоской магнитной осью.

Метод расчета  $\nabla\Phi$  использован для исследования в известном трехмерно-неоднородном магнитном поле стеллараторных систем ряда характеристик удержания плазмы, связанных с плазменными токами равновесия. Метод обобщенного бананового кинетического уравнения использован, в частности, для исследования неклассической диффузии в стеллараторах с винтовой магнитной осью.

В диссертации рассмотрены также некоторые другие вопросы, в том числе посвященные описанию магнитного поля торсатронов.

Во Введении обосновывается актуальность проблемы, формулируется цель диссертационной работы, дается краткое описание выполненных исследований.

Первая глава диссертации посвящена описанию магнитного поля торсатронов (у которых в отличие от обычных стеллараторов с винтовыми проводниками отсутствует чередование направления тока полюсов винтовой обмотки) и исследованию центральной области магнитной конфигурации  $\ell=3$  торсатронов. Для торсатронов характерным является использование определенных законов навивки винтовых проводников с целью улучшения магнитной конфигурации (Hubert P. - Comp. Rend. Acad. Sc., Paris, 1971. Vol. 272, p. 661. Данилкин И.С., Шпигель И.С. - В кн.: Стеллараторы. Труды ФИ АН СССР. Т. 65. М., Наука, 1973. С. 50-64.). Как известно, закон навивки с точностью до величин порядка  $\delta^2$  ( $\delta=r_0/R$ ,  $R$  и  $r_0$  - большой и малый радиусы тора, на котором расположены винтовые проводники) может быть представлен в виде

$$m(\varphi - \varphi_0)/\ell = \vartheta - \alpha_1 (r_0/R) \sin\vartheta - \frac{1}{2} \alpha_2 (r_0/R)^2 \sin 2\vartheta, \quad (1)$$

где угол  $\varphi$  отсчитывается вокруг главной оси тора ( $\varphi_0$  - начальное значение  $\varphi$ ), угол  $\vartheta$  отсчитывается вокруг круговой оси тора от направления нормали к этой оси,  $\ell$  - полоидальная мультипольность винтового поля,  $m$  - число периодов винтового поля на длине тора,  $\alpha_1$

и  $\alpha_2$  - коэффициенты модуляции угла навивки. В первом разделе гл.1 путем разложения формул Био-Савара в ряды по малым параметрам  $\delta$  и  $r/r_0$  ( $r$  - расстояние от круговой оси тора) с последующим интегрированием по длине проводников получены формулы /1-4/ компонентов магнитного поля стеллараторов и торсатронов в виде разложений по степеням  $\delta = r_0/R \ll 1$  и  $r/r_0 \ll 1$  с учетом крутизны навивки винтовых проводников и модуляции угла их навивки. Эти формулы могут использоваться для аналитических расчетов различных явлений на достаточно малых расстояниях от круговой оси тора.

Второй раздел гл.1 посвящен описанию магнитного поля торсатронов в тороидальных координатах с помощью рядов тороидальных гармоник с присоединенными функциями Лежандра. Токи во всех винтовых проводниках торсатрона протекают в одном направлении. Это приводит к наличию в его магнитном поле аксиально-симметричной составляющей полоидального поля. В настоящей работе для описания этой составляющей использована аксиально-симметричная составляющая векторного потенциала  $A_\phi$ . Преимущество такого описания /5/ связано с быстрой сходимостью разложения  $A_\phi$  в тригонометрический ряд и удобством получения коэффициентов разложения в этот ряд. Получены общие выражения для коэффициентов разложения  $A_\phi$  для поверхностного распределения винтовых токов на тороидальной поверхности и конкретные формулы коэффициентов для закона навивки, соответствующего выражению (1). Для такого же закона навивки получены также коэффициенты использовавшегося ранее разложения скалярного потенциала тороидального винтового магнитного поля (Коврижных Л.М. Журн. Тех. Физ., 1963. Т.33, с.377).

Рассмотренное описание /5/ во многих важных случаях (при аспектовом отношении  $R/r_0 \geq 4$ ) позволяет существенно сократить (на порядок и более) затраты машинного времени при расчетах магнитного поля на ЭВМ по сравнению с затратами при использовании закона Био-Савара. Оно было использовано при расчете магнитного поля торсатронов в ряде опубликованных работ, а также используется в ряде расчетов, выполненных в настоящей диссертации.

В третьем разделе гл.1 (раздел 1.3) с помощью полученных в первом разделе формул выполнен анализ островной структуры магнитных поверхностей в центральной области магнитных конфигураций  $\ell=3$  стеллараторов и торсатронов. Возникновение такой

структуры в указанной области под влиянием тороидалности было обнаружено ранее аналитически и численно в ряде работ. При этом была выявлена возможность улучшения магнитной конфигурации торсатрона при использовании внешнего поперечного (вертикального) поля, различного рода компенсационных обмоток и модуляции угла навивки винтовых проводников.

В настоящей диссертации условия образования островной структуры магнитных поверхностей исследованы с применением аналитических методов (поскольку до этого центральная область магнитной конфигурации торсатронов исследовалась только путем численного интегрирования уравнений силовых магнитных линий). Для этого с использованием формул компонентов магнитного поля, полученных в первом разделе гл.1, было получено уравнение усредненных магнитных поверхностей. В результате его анализа получены формулы, описывающие условия наличия (или отсутствия) островных поверхностей. Эти формулы определяют соответствующие связи между параметрами закона навивки и величинами винтового, продольного и поперечного магнитных полей и могут быть использованы при оптимизации магнитных конфигураций  $\ell=3$  торсатронов в их центральной области.

Поскольку требования к параметрам магнитной системы ловушки из условий хорошего качества магнитных поверхностей в центральной области магнитной конфигурации и во всем объеме удержания могут отличаться, следует рекомендовать сочетать аналитическое и численное исследования таких конфигураций. Основные результаты 3-го раздела гл.1 опубликованы в работах /1,3,6,7/.

Во второй главе диссертации рассматривается метод расчета градиента функции магнитных поверхностей  $\nabla\Phi$  в известном трехмерно-неоднородном тороидальном магнитном поле. Расчеты такой величины необходимы при исследовании явлений тесно связанных с градиентом давления плазмы  $\nabla p$  и плазменными токами равновесия  $\vec{j}$ . В системах тороидального удержания плазмы давление плазмы является постоянной величиной на магнитной поверхности. Поэтому,  $\nabla p = \frac{dp}{d\Phi} \nabla\Phi$ , где  $\Phi$  есть функция магнитных поверхностей, удовлетворяющая уравнению

$$\vec{\nabla}\Phi=0. \quad (2)$$

При численном решении различных задач по удержанию плазмы в стеллараторных системах с трехмерно-неоднородным магнитным полем

оказываются возможными различные подходы. Среди них имеются подходы, связанные с возможностью прямого вычисления  $\nabla\psi$  по заданному магнитному полю (M.L. Berk, M.N. Rosenbluth, J.L. Shohet. Phys. Fluids, 1983. Vol.26, p.2616). В настоящей диссертации для вычисления  $\nabla\psi$  в известном магнитном поле предложен подход /8-10/, основанный на решении полученной для этого системы дифференциальных уравнений для компонентов  $\nabla\psi$ . Особенностью такого подхода является его относительная простота и удобство, высокая эффективность и достаточно высокая точность при расчетах  $\nabla\psi$  с учетом тонкой структуры магнитной конфигурации, позволяющая выполнять расчеты для островных магнитных поверхностей и присепаратрисной области магнитной конфигурации.

В первом разделе гл.2 на основе уравнения (2) получена система дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка с одинаковой главной частью для компонентов  $\nabla\psi$  в заданном магнитном поле. Соответствующая этой системе характеристическая система обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием распределения магнитного поля и его пространственных производных позволяет путем интегрирования вдоль силовой магнитной линии рассчитать распределение  $\nabla\psi$  на магнитной поверхности, образуемой этой линией. Эта система имеет вид

$$\frac{d\xi_1}{d\tau} = B^1(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \quad \frac{d\xi_2}{d\tau} = B^2(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \quad \frac{d\xi_3}{d\tau} = B^3(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{d\tau} &= -\frac{\partial B^1}{\partial \xi_1} P - \frac{\partial B^2}{\partial \xi_1} Q - \frac{\partial B^3}{\partial \xi_1} G, \\ \frac{dQ}{d\tau} &= -\frac{\partial B^1}{\partial \xi_2} P - \frac{\partial B^2}{\partial \xi_2} Q - \frac{\partial B^3}{\partial \xi_2} G, \\ \frac{dG}{d\tau} &= -\frac{\partial B^1}{\partial \xi_3} P - \frac{\partial B^2}{\partial \xi_3} Q - \frac{\partial B^3}{\partial \xi_3} G, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\tau$ -параметр, являющийся переменной интегрирования,  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ -общая криволинейная система координат,  $P = \partial\psi / \partial \xi_1$ ,  $Q = \partial\psi / \partial \xi_2$ ,  $G = \partial\psi / \partial \xi_3$ ;  $B^1, B^2$  и  $B^3$ -контравариантные компоненты вектора магнитного поля  $B$ . В этом же разделе обсуждается вопрос выбора исходных значений  $\nabla\psi$ , необходимого для интегрирования указанной системы. Для иллюстрации приведены результаты некоторых расчетов распределения  $\nabla\psi$  вдоль различных магнитных поверхностей, в том числе для приграничных и островных магнитных поверхностей.

Во втором разделе гл.2 на основе предложенного метода вычисления  $\nabla\Phi$  получены уравнения для численных расчетов в известном стеллараторном магнитном поле плазменных токов равновесия (с использованием уравнений МГД равновесия плазмы), содержащие уравнения (3), (4) и уравнения  $\vec{j}_{\perp} = \text{ср}'[\nabla\Phi]/|B|^2$ ,  $\vec{j}_{\parallel} = \text{ср}'h\nabla$  (штрих обозначает производную по  $\Phi$ ), где

$$dh/d\tau = -2[\nabla\Phi]\nabla\Phi/|B|^3. \quad (5)$$

Получены также уравнения для расчета распределения на магнитной поверхности нормальной к магнитной поверхности составляющей скорости дрейфа заряженных частиц в неоднородном магнитном поле.

Третий раздел гл.2 посвящен обсуждению вычисления интегралов по объему магнитного слоя (слоя между двумя бесконечно близкими нерациональными магнитными поверхностями) с использованием интегрирования вдоль силовой магнитной линии для величин, связанных с  $\nabla\Phi$ . Вычисление таких интегралов необходимо при определении ряда параметров, характеризующих удержание плазмы. К числу таких параметров, в частности, относится параметр оптимизации стеллараторов

$$\gamma_{\parallel}/\gamma_{\perp} = \int j_{\parallel}^2 \delta V / \int j_{\perp}^2 \delta V. \quad (6)$$

Для его вычисления уравнения (3)-(5) должны быть дополнены уравнениями ( $B_0$  - средняя величина магнитного поля)

$$df_1/d\tau = (h\nabla B_0)^2, \quad df_2/d\tau = (B_0 \nabla\Phi/B)^2, \quad df_3/d\tau = |\nabla\Phi|,$$

с помощью которых получаютя

$$\gamma_{\parallel} = f_1(\tau_m)/f_3(\tau_m), \quad \gamma_{\perp} = f_2(\tau_m)/f_3(\tau_m), \quad \tau_m \rightarrow \infty$$

( $\tau_m$  - верхний предел интервала интегрирования по  $\tau$ ).

Полученные в гл.2 системы обыкновенных дифференциальных уравнений использованы в гл.3 и 4 для соответствующих расчетов путем интегрирования вдоль силовых магнитных линий.

Третья глава диссертации посвящена исследованию плазменных токов равновесия  $\vec{j}$  в ряде конкретных стеллараторных магнитных конфигураций (в линейном приближении по  $\beta$ ,  $\beta = 8\pi r/B^2$  - отношение газокINETического давления плазмы к магнитному давлению). Расчеты плазменных токов равновесия являются необходимым этапом при исследовании ряда характеристик удержания плазмы. В то же время

исследование этих токов имеет также самостоятельное значение, т.к. отношение  $J_{\parallel}/J_{\perp}$  является одним из параметров оптимизации стеллараторов в том числе оптимизации их вакуумных магнитных конфигураций (Chodura R., Dommaschk W., Herrnegger F., et al. - IEEE Trans. Plasma Sci., 1981. Vol. PS-9. P.221). Для расчета токов равновесия в настоящей главе использованы методы, рассмотренные в гл.2.

В первом разделе гл.3 выполнено сравнительное исследование плазменных токов равновесия в одном из первоначальных вариантов  $\ell=2$  торсатрона "Ураган-2М" ( $m=8$ ) для двух законов навивки (1) винтовой обмотки ( $\alpha_1=-1, \alpha_2=0$  и  $\alpha_1=1, \alpha_2=0$ ). Закон навивки при  $\alpha_1=-1$  соответствует навивке винтовых проводников по закону тороидальной спирали и близок к оптимальному закону (Hanson J.D., Cary J.R. Phys. Fluids. 1984. Vol.27. P.767). В то же время аналитически было показано (Шишкин А.А. ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез. 1987. Вып.2. С.15), что при выборе  $\alpha_1=1$  возможно значительное снижение плазменного тока равновесия по сравнению со случаем  $\alpha_1=-1$ . Полученные в настоящей работе результаты /11/ показали, что для рассмотренных магнитных конфигураций выбор закона навивки с  $\alpha_1=1$  действительно приводит к уменьшению  $J_{\parallel}$  (по сравнению со случаем  $\alpha_1=-1$  при том же самом  $|\nabla p|$ ) вплоть до приграничных магнитных поверхностей, однако полезный объем удержания при  $\alpha_1=1$  оказывается значительно меньшим, чем при  $\alpha_1=-1$ .

Второй раздел гл.3 посвящен исследованию плазменных токов равновесия в ловушке стеллараторного типа ДРАКОН (длинная равновесная конфигурация). Такая система была предложена в связи с необходимостью совершенствования систем магнитного удержания (Glagolev V.M., Kadomtsev B.B., Shafranov V.D., Trubnikov V.A. 10-th Europ. Conf. on Controlled Fus. and Plasma Phys. Moscow, 1981. Vol.1. P. PE-8). Удержание плазмы в этой системе исследовалось аналитическими методами в ряде работ. Магнитная система ДРАКОНА содержит длинные прямолинейные участки с продольным магнитным полем, которые соединяются криволинейными равновесными элементами с повышенным магнитным полем (КРЭЛами). Важным требованием к этой системе является такой выбор параметров КРЭЛов, при котором токи Пфирша-Шлютера замыкались бы внутри КРЭЛов и не выходили на прямолинейные участки.

В настоящей работе численными методами выполнен расчет токов равновесия для одного из обсуждавшихся ранее вариантов ДРАКОНА с КРЭМом из трех полуторов, плоскости которых образуют друг с другом углы  $120^\circ$ . Из результатов расчета (см. также /12,13/) следует, что для этого варианта КРЭЛа при оптимальном выборе его параметров  $J_{\parallel}$  на прямолинейных участках ДРАКОНА оказался существенно меньше, чем известный ток Пфирша-Шлютера в тороидальных ловушках. Однако в нуль этот ток полностью не обращается и его распределение и величина могут зависеть от таких факторов, как длина прямых участков, пробочное отношение и гофрировка магнитного поля.

Третий раздел гл.3 посвящен исследованию плазменных токов равновесия в магнитных конфигурациях  $l=2$  и  $l=3$  торсатронов с параметрами, близкими к параметрам торсатронов "Ураган-2М" (для стандартного варианта конфигурации) и "Ураган-3". Исследовалась зависимость этих токов от величины однородного вертикального магнитного поля, дополнительного к основному полю торсатрона. Такое поле часто используется в стеллараторных системах для регулирования характеристик магнитной конфигурации. Кроме того вертикальное магнитное поле является существенной составляющей магнитного поля, возбуждаемого в плазме равновесными плазменными токами. В качестве интегральной характеристики распределения  $J_{\parallel}$  и  $J_{\perp}$  вдоль магнитных поверхностей вычислялся параметр (6). Вместе с ним рассчитывалась также однородная составляющая вертикального магнитного поля, возбуждаемого плазменными токами внутри плазмы (для модели однородного плазменного шнура с резкой границей).

Полученные результаты /14-16/ сравнивались с аналитическим значением параметра (6) для простейшей модели стеллараторного поля (именуемому далее как "классический" стелларатор). При выборе направления дополнительного вертикального магнитного поля, при котором происходит сдвиг магнитной конфигурации наружу тора, в зависимости от величины этого поля и расстояния от магнитной оси полученная величина параметра (6) оказалась в пределах от значения, получающегося для "классического" стелларатора, до величины в 2 + 3 раза превышающей это значение. С увеличением дополнительного вертикального поля возрастала во многих случаях также величина вертикального магнитного поля, возбуждаемого плазменными токами равновесия.

Как известно, наличие в магнитном поле стеллараторов (и торсатронов) вертикального поля выше некоторой величины может приводить к значительному сокращению полезного объема удержания (см., напр., Gourdon C., Marty D., Maschke E.K., Dumovt I.P. In Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. (Proc. 3rd Int. Conf. Novosibirsk, 1968), IAEA, Vienna. Vol.1, p.847). Этот факт в настоящей работе был использован для оценки в рассмотренных конфигурациях предельного равновесного  $\beta$  в случае плазмы со свободной границей по величине вертикального магнитного поля, возбуждаемого внутри плазмы токами равновесия. Согласно полученным оценкам существенное сокращение указанного объема в рассмотренных для "Ураган-2М" и "Ураган-3" магнитных конфигурациях получается при  $\beta$  порядка 4% + 5%.

В четвертой главе диссертации рассмотрено применение описанных в гл.2 методов к исследованиям процессов переноса в сильно столкновительной плазме (режим Пфирша-Шлютера) и критерия МГД устойчивости Мерсье в реалистичных стеллараторных конфигурациях с учетом трехмерной структуры их магнитного поля. Исследование процессов переноса /17,18/ обсуждается в первом разделе этой главы.

Основные трудности при анализе режима Пфирша-Шлютера в стеллараторах возникают при необходимости учета влияния на диффузионные потоки реального распределения магнитного поля конкретных установок. Благодаря отсутствию симметрии магнитного поля оказывается практически невозможным получить аналитическое выражение для функции магнитных поверхностей на сравнительно больших расстояниях от магнитной оси. Целью 1-го раздела гл.4 является исследование потоков частиц и тепла в указанном режиме с полным учетом влияния на эти потоки трехмерной неоднородности рассматриваемого магнитного поля стелларатора.

Рассмотрены расчеты потоков частиц и тепла в чистой плазме и в плазме с примесями в случае одного сорта примесных ионов. Для плазмы с примесями эти потоки рассматриваются также при наличии источников частиц и тепла, используемых для управления потоками примесей.

Для вычисления потоков частиц в чистой плазме использованы в качестве исходных выражения для этих потоков в общей геометрии

магнитного поля (В.Д. Шафранов Вопросы теории плазмы. 1963. Вып.2. С.92-131). При расчетах потоков примесей и расчетах управления этими потоками с помощью источников частиц и тепла используются исходные предпосылки работ, в которых подобные расчеты выполнялись для токамаков (Rutherford P.H. Phys. Fluids, 1974. Vol.17, p.1782. Bittell K.H. Phys. Fluids, 1976. Vol.19, p.401).

Как показано В.Д. Шафрановым, увеличение потоков частиц поперек магнитных поверхностей в чистой плазме, обусловленное сложной геометрией магнитного поля стеллараторов, определяется параметром (6). Этим же параметром определяется в столкновительной плазме соответствующее увеличение потоков тепла (В.Д. Шафранов. Атомная Энергия. 1965. Том 19, с.120). Из результатов настоящей работы следует, что параметром (6) определяется в режиме Пфирша - Шлютера также обусловленное сложной геометрией магнитного поля увеличение потоков примесных ионов. Таким образом, выполняемое при анализе плазменных токов равновесия вычисление методами гл.2 параметра (6) позволяет определять в реальной геометрии магнитного поля стеллараторов и торсатронов увеличение потоков частиц и тепла как в чистой плазме, так и в плазме с примесями.

Второй раздел гл.4 посвящен применению методов гл.2 к расчетам критерия МГД устойчивости Мерсье в стеллараторах. В настоящее время этот критерий часто используется при исследовании МГД устойчивости как в аналитических исследованиях (В.Д. Пустовитов, В.Д.Шафранов. ВТП, 1987. Вып.15. С.146), так и при численных расчетах в конкретных магнитных конфигурациях (см., например, Dominguez N., Carreras B.A., Lynch V.E., et al. Rep. ORNL/TM-11701, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 1990).

Подход /19/ к вычислению критерия Мерсье, применяемый в настоящей работе, близок к подходу, в котором представление этого критерия, основанное на интегрировании вдоль силовой магнитной линии, находящейся на нерациональной магнитной поверхности, получается путем асимптотического анализа балонного уравнения (M.L. Berk, M.N. Rosenbluth, J.L. Shohet, Phys. Fluids, 1983. Vol.26, p.2616). В настоящей работе подобного рода представление получено на основе выражения для критерия Мерсье, полученного в работе В.Д. Пустовитова и В.Д. Шафранова (ВТП, 1987. Вып.15. С.146). При этом для вычисления входящих в критерий Мерсье интег-

ралов по объему магнитного слоя использовано интегрирование вдоль силовых магнитных линий.

Основной отличительной особенностью полученного представления является то, что оно позволяет непосредственно использовать метод вычисления  $\nabla\Phi$ , рассмотренный в гл.2. Кроме того, с его помощью в случае нарушения критерия устойчивости удобно проследить появление второй зоны устойчивости при увеличении градиента давления и оно оказывается применимым (в окончательном виде) как при равном нулю суммарном продольном токе равновесия, так и при относительно малой отличной от нуля величине этого тока. Как и в работе M.L. Berk, M.N. Rosenbluth, J.L. Shohet, полученное представление использовано для анализа устойчивости плазмы малого давления, но с конечным локальным градиентом давления.

В случае плазмы малого газокинетического давления, но с конечным локальным градиентом давления, полученное представление для критерия устойчивости Мерсье имеет вид  $D < 1/4$  при

$$D = p' \frac{[f_{GB}^V(\tau_m) - f_{hS}^V(\tau_m)] f_B^V(\tau_m)}{[f_S^V(\tau_m) - p' f_{hB}^V(\tau_m)]^2}, \quad (\tau_m \rightarrow \infty),$$

где  $f_{GB}^V$ ,  $f_{hS}^V$ ,  $f_B^V$ ,  $f_S^V$  и  $f_{hB}^V$  определяются уравнениями

$$df_{GB}^V/d\tau = \nabla\Phi \nabla B_V^2 / B_V^2 |\nabla\Phi|^2, \quad df_{hS}^V/d\tau = hS_V, \quad df_B^V/d\tau = B_V^2 / |\nabla\Phi|^2,$$

$$df_S^V/d\tau = S_V, \quad df_{hB}^V/d\tau = hB_V^2 / |\nabla\Phi|^2, \quad S = \frac{[\vec{B}\nabla\Phi]}{|\nabla\Phi|^2} \text{rot} \frac{[\vec{B}\nabla\Phi]}{|\nabla\Phi|^2}$$

( $\tau_m$  - верхний предел интервала интегрирования по  $\tau$ ,  $B_V$  - вакуумное поле). Эти уравнения должны быть дополнены уравнениями (3)-(5).

Использованный подход позволяет определить границы по величине  $|\nabla r|$  области устойчивости для каждой рассматриваемой магнитной поверхности и выявить области плазменного шнура, в которых оказывается возможным нарушение критерия устойчивости при спадающем наружу давлении плазмы. После этого оказывается возможным определить предельно допустимую по устойчивости величину  $\beta$  в зависимости от рассматриваемого профиля давления и того, в какую область плазменного шнура попадает максимум  $|\nabla r|$ .

Рассмотренный метод использован для численных расчетов критерия Мерсье на ЭВМ в реалистичной магнитной конфигурации двухзаходного торсатрона с параметрами "Ураган-2М", рассматривавшейся в разделе 3 гл.3, для плазмы малого давления, но с конечным локальным градиентом давления.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию неоклассической диффузии в стеллараторах. В области малых частот соударений частиц в стеллараторах частицы, запертые на винтовых неоднородностях магнитного поля (так называемые локально запертые частицы - винтовые бананы), могут за счет тороидального дрейфа приводить к особенно большим коэффициентам переноса. Поэтому изучению связанных с этим дрейфом процессов переноса в стеллараторах уделяется особое внимание.

Эффективным подходом к исследованию процессов переноса в стеллараторах в связи с диффузией, обусловленной локально запертыми частицами, явилось использование бананового кинетического уравнения (А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев, Г.П.Фюрс. ПМТФ, 1968. N 6, с.3. Галеев А.А., Сагдеев Р.З. ВТН, 1973. Вып.7. С.205), которое было получено путем усреднения дрейфового кинетического уравнения по периоду колебания этих частиц между винтовыми неоднородностями магнитного поля. В первых работах по теории неоклассической диффузии в стеллараторах использовались относительно простые модели магнитного поля таких ловушек. Необходимость исследования стеллараторных систем с более сложной геометрией магнитного поля требовала для метода бананового кинетического уравнения соответствующего обобщения.

Такая работа выполнена в первом разделе гл.5. В этом разделе предложен подход /20/, в котором учет роли геометрии магнитного поля в банановом кинетическом уравнении осуществляется через продольный инвариант движения запертых частиц  $J = \oint v \, dl$ , получающийся с помощью интегрирования вдоль силовой магнитной линии между точками отражения этих частиц ( $v$  - составляющая скорости частиц вдоль магнитного поля). При этом банановое кинетическое уравнение получено в общей криволинейной системе координат  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ , где  $\xi_1(\vec{r}) = \text{const}$  представляет собой уравнение магнитной поверхности рассматриваемой системы, силовая линия образуется пересечением поверхностей  $\xi_1 = \text{const}$  и  $\xi_2 = \text{const}$ , и координатные линии  $\xi_3$  совпадают с силовыми линиями магнитного поля. Оно может поэтому быть использовано в стеллараторах с произвольной геометрией магнитного поля и имеет вид

$$\frac{\partial J}{\partial \xi_2} \frac{\partial f}{\partial \xi_1} - \frac{\partial J}{\partial \xi_1} \frac{\partial f}{\partial \xi_2} = \nu_j m_j^2 v_{Aj}^2 \frac{e_j B}{m_j c} \sqrt{\frac{g}{g_{33}}} \frac{\partial}{\partial w} \left( J \frac{\partial f}{\partial w} \right),$$

где  $w$  - энергия частиц,  $g_{1k}$  - метрический тензор системы координат  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ ,  $g = \text{Det } g_{1k}$ . Остальные обозначения общеизвестны.

Получены также формулы потоков частиц и тепла, определяемых дрейфом бананов поперек магнитных поверхностей, выражающиеся через продольный инвариант движения запертых частиц. Отметим, что усредненное кинетическое уравнение несколько иного вида с продольным инвариантом движения запертых частиц применялось для исследования неклассического переноса в стеллараторах также в работе L.M.Kovrizhnikh. Nucl. Fusion, 1984. Vol.24, p.851.

Во втором разделе гл.5 полученное банановое кинетическое уравнение применено к исследованию процессов переноса в  $\ell=3$  стеллараторе (торсатроне) при произвольном соотношении между тороидальной ( $\epsilon_t = r/R \ll 1$ ) и винтовой ( $\epsilon_n \ll 1$ ) неоднородностями магнитного поля. До этого рассматривались предельные случаи  $\epsilon_t \ll \epsilon_n$  либо  $\epsilon_t \gg \epsilon_n$ . Исследование случая  $\epsilon_t \gg \epsilon_n$  (К. Miyamoto. Phys. Fluids, 1974. Vol.17, p.1476), выполненное при условии очень редких соударений частиц в отсутствие радиального электрического поля, показало, что все частицы, запертые на винтовых неоднородностях магнитного поля, уходят из ловушки. Это приводит к значительному сокращению времени жизни остальных частиц и тепла вследствие образующегося 'конуса' потерь на границе фазового пространства между пролетными и запертыми частицами. Время жизни оказывается при этом порядка времени между кулоновскими соударениями частиц.

В диссертации рассмотрен случай более высоких частот соударений частиц, когда за времена, соответствующие эффективной частоте соударений частиц, локально запертые частицы не успевают выдрейфовать за пределы плазменного шнура. Полученное для коэффициента диффузии выражение  $\propto 1/\nu$  зависит от частоты соударений частиц  $\nu$  как  $1/\nu$ . Это выражение позволяет вычислять коэффициент диффузии при произвольном соотношении между  $\epsilon_t$  и  $\epsilon_n$ . Оно переходит в известные уже выражения для коэффициентов диффузии в пределе  $\epsilon_t \ll \epsilon_n$ , а при  $\epsilon_t \gg \epsilon_n$  качественно совпадает с полученным ранее для такого условия выражением коэффициента диффузии в двухзаходном стеллараторе (А.А. Галеев, Р.З. Сагдеев. Вопросы теории плазмы. 1973. Вып.7. С.205).

В третьем разделе гл.5 исследуется диффузия, обусловленная дрейфом винтовых бананов, в винтовых торах (А.Е. Бажанова, В.М.Глаголев, В.Д. Шафранов), представляющих собой замкнутые ловушки с пространственной магнитной осью, образующиеся путем навивки соленоида на поверхность тора. Прототипом таких ловушек является известная 'восьмерка' Спитцера, в которой вращательное преобразование силовых магнитных линий получается за счет кручения геометрической оси соленоида. Перспективность винтовых торов как основы будущих термоядерных реакторов обсуждалась в ряде работ (А.Е. Бажанова, В.М.Глаголев, В.Д. Шафранов. Ж. Тех. Физики, 1966. Т.36, с.1575. -А.Б. Михайловский, В.Д. Шафранов. ЖЭТФ, 1974. Т.66, с.190). Концепция винтовых торов получила дальнейшее развитие в ловушках типа "Asperator NP" (Y. Funato, I. Sakamoto, T. Asaishi, et al., Plasma Phys., 1980. Vol.22, p.545).

Исследование, выполненное с помощью полученного в первом разделе 5-й главы бананового кинетического уравнения, показало /22-24/, что при редких соударениях частиц, когда эффективная частота соударений  $\nu_{eff}$  меньше обратного периода колебаний запертых частиц между магнитными пробками  $\omega_b$ , коэффициенты переноса в винтовых торах увеличиваются и ведут себя с изменением  $\nu$  подобно тому, как они ведут себя в стеллараторах с винтовыми проводниками в зависимости от соотношения  $\nu_{eff}$  и частоты прецессии винтовых бананов вокруг магнитной оси  $\omega_0$ . При  $\nu_{eff} > \omega_0$ , коэффициенты переноса с уменьшением  $\nu$  увеличиваются как  $1/\nu$ . При  $\nu_{eff} < \omega_0$  эти коэффициенты с уменьшением  $\nu$  уменьшаются. В последнем случае зависимость коэффициентов переноса от  $\nu$  оказывается более сложной, чем в стеллараторах с плоской магнитной осью, вследствие более сложного характера дрейфа винтовых бананов в винтовых торах. Выполненное исследование показало, что потоки частиц и энергии в винтовых торах можно уменьшить путем выбора определенного соотношения между радиусом пространственной оси соленоида и ее шагом, а также определенной модуляции угла навивки пространственной оси соленоида.

Возможность такого уменьшения связана с зависимостью средней скорости дрейфа бананов поперек магнитных поверхностей в винтовых торах от параметра запертости частицы, образующей банан, т.е. от длины банана. При определенном выборе параметров магнитного поля ловушки эта скорость для группы бананов определенной длины может существенно уменьшаться. Уменьшение коэффициентов переноса, свя-

занное с этим эффектом, может проявляться наиболее сильно в области малых частот соударений частиц ( $\nu_{\text{eff}} < \omega_0$ ) левее характерного горба на кривой зависимости коэффициентов переноса от частоты соударений. Для этого параметры магнитной системы ловушки должны быть выбраны таким образом, чтобы указанная группа бананов (с малой скоростью дрейфа поперек магнитных поверхностей) соответствовала частицам, скорости которых близки к границе раздела пространства скоростей на область локально запертых и область пролетных (тороидально запертых) частиц.

Характерные для винтовых торов особенности в движении запертых частиц и в связанном с этим поведении коэффициентов переноса проявляются также в ловушках с винтовой магнитной осью, образуемой магнитным полем винтовых обмоток (V.F. Aleksin, V.P. Sebko. Nucl. Fusion, 1984. Vol.24, p.145), как это следует из /20/. Можно ожидать, что такие же особенности будут иметь место в системе "Asperator NP" и в других системах с винтовой магнитной осью (напр., "Heliac", Boozer A.H., Chu T.K., Dewar R.L., et al. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Research (Proc.9th Int.Conf.Baltimore, 1982), IAEA, Vienna, 1983. Vol.3, p.129).

Полученные формулы коэффициентов переноса могут использоваться при сравнительных оценках времени жизни частиц и тепла в винтовых торах и в стеллараторах с плоской магнитной осью в зависимости от геометрии их магнитного поля.

После создания основ теории неоклассической диффузии в стеллараторах было выполнено большое количество работ, в которых рассматривались различные вопросы в связи с этой теорией (см. обзор L.M.Kovrizhnikh. Nucl. Fusion, 1984. Vol.24, p.851). Значительное внимание при этом уделялось исследованию эффектов, приводящих к уменьшению потоков частиц и тепла, обусловленных тороидальным дрейфом локально запертых частиц. На возможность уменьшения этих потоков указывали, в частности, результаты математического моделирования процессов переноса в реальном магнитном поле  $\ell=3$  торсатрона (Potok R.E., Politzer P.A., Lidsky L.M. Phys. Rev. Lett., 1980. Vol.45, p.1328). К числу эффектов, способствующих уменьшению неоклассической диффузии в стеллараторных системах, относятся эффекты, связанные с бесстолкновительными переходами локально запертых

частиц в пролетные (или тороидально запертые) и наоборот (этот эффект рассматривался еще в работах А.А. Галеева и Р.З. Сагдеева, его дальнейшее исследование можно найти в работах Л.М. Коврижных, К.С. Shaing и ряда других авторов), а также эффекты, связанные с определенным выбором гармонического состава магнитного поля ловушки (Н.Е. Мулицк, Т.К. Чу, А.Н. Воозер, Л.М. Коврижных, А.А. Пишкин).

Среди факторов, которые могут приводить к уменьшению неклассических потоков частиц и тепла в стеллараторах, можно указать /25,26/ еще один эффект, который рассмотрен в настоящей диссертации. Причиной такого эффекта может являться запаздывание при редких соударениях частиц релаксации функции распределения в области пространства скоростей, соответствующей пролетным частицам, что может приводить к уменьшению доли локально запертых частиц и уменьшению их градиента.

Обычно при вычислении диффузионных потоков частиц и тепла неклассической диффузии в стеллараторах считается, что на границе раздела фазового пространства на область, соответствующую локально запертым частицам, и область, соответствующую остальным частицам (пролетным и тороидально запертым), функция распределения близка к максвелловскому распределению. В случае редких соударений частиц это предположение не всегда может выполняться. Если частота соударений частиц мала, то их столкновения могут не успевать восстанавливать на указанной границе максвелловское распределение, которое нарушается благодаря дрейфу локально запертых частиц поперек магнитных поверхностей. Так, например, при  $\epsilon_t \gg \epsilon_n$  в случае очень редких соударений частиц функция распределения на этой границе вообще равна нулю.

Отличие на границе области фазового пространства для локально запертых частиц функции распределения от максвелловского распределения может приводить к изменению неклассических диффузионных потоков в стеллараторах по сравнению с результатами для этих потоков, получающимися без учета этого эффекта. Потоки частиц и тепла преобретают при этом нелокальный характер по отношению к распределению по сечению плазменного шнура плотности и температуры частиц и их градиентов. Оценки показывают, что этот эффект становится существенным, когда энергетическое время жизни плазмы, оцениваемое с помощью формул неклассической диффузии, становится порядка време-

ни между кулоновскими соударениями частиц. Рассмотренный эффект, как оказалось, проявляется при частотах соударений, которые могут реализоваться в установках с термоядерными параметрами плазмы. Исследованию этого вопроса посвящено содержание четвертого раздела гл.5.

В Заключении дана сводка основных результатов диссертации.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Получены формулы для компонентов магнитного поля стеллараторов и торсатронов в виде разложений по степеням  $\delta = r_0/R \ll 1$  и  $r/r_0 \ll 1$  с учетом крутизны навивки винтовых проводников и модуляции угла их навивки. Эти формулы использованы, в частности, для анализа центральной области магнитных конфигураций  $\ell=3$  стеллараторов и торсатронов и могут использоваться для аналитических расчетов различных явлений на достаточно малых расстояниях от магнитной оси.

2. Получено уравнение усредненных магнитных поверхностей в центральной области магнитных конфигураций  $\ell=3$  стеллараторов и торсатронов с учетом закона навивки проводников винтовой обмотки. Путем анализа этого уравнения получены условия образования островных магнитных поверхностей в зависимости от соотношений винтового, продольного и поперечного магнитных полей и параметров закона навивки. Эти условия могут использоваться при выборе оптимальных соотношений между параметрами магнитной системы  $\ell=3$  торсатронов.

3. Использовано описание аксиально-симметричной составляющей полоидального магнитного поля торсатронов посредством разложения векторного потенциала в тороидальной системе координат в ряды тороидальных гармоник с присоединенными функциями Лежандра. Получены формулы коэффициентов разложения в ряд для различных законов навивки винтовой обмотки. Подобные формулы получены также для коэффициентов использовавшегося ранее разложения скалярного потенциала винтового тороидального магнитного поля. Указанное описание магнитного поля торсатронов применимо при произвольных расстояниях от магнитной оси и во многих важных случаях (при аспектовом отношении  $R/r_0 \gg 4$ ) позволяет при расчетах магнитного поля на ЭВМ на порядок и более сократить затраты машинного времени по сравнению с

затратами при использовании закона Био-Савара. Оно было использовано в ряде работ при анализе магнитных конфигураций торсатронов "Ураган-3" и "Ураган-2М".

4. Предложен метод расчета в заданном трехмерно-неоднородном тороидальном магнитном поле распределения вдоль магнитных поверхностей градиента функции магнитных поверхностей  $\psi$  (с возможным применением численных методов), основанный на интегрировании вдоль силовых магнитных линий. Для этого получена система дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка с одинаковой главной частью для компонентов  $\psi$  и соответствующая ей характеристическая система обыкновенных дифференциальных уравнений. Предложенный метод может использоваться при исследовании равновесия, устойчивости и удержания плазмы в ловушках стеллараторного типа в тех случаях, когда магнитные поверхности определяются только численными методами.

5. Получены уравнения, позволяющие с использованием предложенного подхода к вычислению  $\psi$  рассчитывать в заданном стеллараторном магнитном поле путем интегрирования вдоль силовых магнитных линий различные связанные с  $\psi$  характеристики удержания: плазменные токи равновесия, параметры оптимизации стеллараторов, определяемые этими токами, различные характеристики удержания, определяемые интегралами по объему магнитного слоя (в том числе коэффициенты диффузии в режиме Пфирша-Шлютера для примесных ионов и критерий МГД-устойчивости Мерсье).

6. С использованием предложенного подхода выполнено численно исследование плазменных токов равновесия (в приближении малого  $\beta$ ) в магнитной конфигурации одного из вариантов ловушки стеллараторного типа ДРАКОН, в котором ранее эти токи исследовались только аналитически. Получено, что желательное в соответствии с концепцией ловушек данного типа требование обращения в нуль продольного тока равновесия на прямолинейных участках для рассмотренного варианта ловушки полностью не выполняется. Несмотря на значительное уменьшение этого тока амплитуда его распределения возрастает с увеличением длины прямолинейных участков, что является неблагоприятным фактором для рассмотренного типа ловушки.

7. С использованием предложенного численного метода выполнено исследование плазменных токов равновесия и связанных с ними параметров оптимизации в магнитных конфигурациях  $\ell=2$  и  $\ell=3$  торсатронов с параметрами, близкими к параметрам установок "Ураган-2М" и "Ураган-3", в зависимости от величины однородного вертикального магнитного поля  $\Delta B_{\perp}$ , дополнительного к основному полю торсатронов. Обнаружено, что с увеличением  $\Delta B_{\perp}$  (вызывающем сдвиг магнитной конфигурации наружу тора) величина параметров оптимизации ухудшается. Согласно сделанным с использованием полученных результатов оценкам предельная величина равновесного  $\beta$  для плазмы со свободной границей в конфигурации "Ураган-3" и стандартной конфигурации "Ураган-2М" составляет величину порядка  $4\% + 5\%$  и причиной ограничения  $\beta$  является сокращение полезного объема удержания.

8. Показано, что в режиме Пфирша-Шлютера геометрический фактор увеличения диффузии примесных ионов вследствие сложной геометрии стеллараторного магнитного поля определяется отношением усредненных по объему магнитного слоя квадратов продольного и поперечного магнитному полю токов равновесия подобно тому, как это имеет место для диффузии частиц и тепла в столкновительной плазме без примесей.

9. С использованием предложенного численного метода выполнено исследование критерия МГД устойчивости плазмы Мерсье для плазмы малого газокINETического давления, но с конечным локальным градиентом давления, в  $\ell=2$  торсатроне с параметрами, близкими к параметрам торсатрона "Ураган-2М" (стандартная конфигурация). Из полученных результатов следует, что при спадающем к границе плазмы давлении критерий Мерсье выполняется при любом допустимом по равновесию  $\beta$ , если к основному магнитному полю торсатрона добавить однородное вертикальное магнитное поле, приводящее к сдвигу магнитной конфигурации наружу тора и составляющее 2% от величины продольного поля. При более низкой величине дополнительного вертикального поля критерий Мерсье может нарушаться.

10. Предложен подход к исследованию неклассической диффузии в стеллараторах со сложной геометрией магнитного поля, в котором учет роли геометрии магнитного поля в банановом кинетическом ур-ав-

нением осуществляется через продольный инвариант движения запертых частиц. Получено соответствующее банановое кинетическое уравнение и формулы потоков частиц и тепла, определяемых дрейфом бананов поперек магнитных поверхностей, которые могут быть использованы для исследований неоклассических потоков частиц и тепла в стеллараторах с произвольной геометрией магнитного поля.

11. С использованием полученного бананового кинетического уравнения выполнено исследование неоклассической диффузии, обусловленной дрейфом бананов поперек магнитных поверхностей, в винтовых торах (ловушках стеллараторного типа, образуемых навивкой соленоида на поверхность круглого тора). Обнаружено, что в винтовых торах средняя скорость дрейфа бананов поперек магнитных поверхностей зависит от параметра запертости частиц (т.е. длины банана). Эта скорость может обращаться в нуль для группы бананов определенной длины в зависимости от параметров магнитного поля, что приводит к уменьшению неоклассических коэффициентов переноса. Указаны связанные с этим способы уменьшения коэффициентов переноса.

12. Обнаружен эффект запаздывания релаксации функции распределения пролетных частиц в стеллараторах в области редких соударений частиц. Этот эффект может быть причиной уменьшения потоков частиц и энергии в стеллараторах по сравнению с их величиной, предсказываемой теорией неоклассической диффузии.

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в работах:

1. Kalyuzhnyj V.N., Nemov V.V. The structure of the magnetic surfaces in the axial region of an  $l=3$  field.- Nucl. Fusion. 1977. Vol.17. P.179.
2. Калюжный В.Н., Немов В.В. Магнитное поле винтовых проводников с током на торе при произвольном шаге намотки.- Препринт ХФТИ АН УССР: ХФТИ 76-5. Харьков, 1976. 32 с.
3. Kalyuzhnyj V.N., Nemov V.V. Paraxial magnetic surfaces in an  $l=3$  torsatron.- Nucl. Fusion. 1981. Vol.21. P.1519.
4. Калюжный В.Н., Немов В.В. Компоненты магнитного поля винтовых проводников с током на торе. - Препринт ХФТИ АН УССР: ХФТИ 81-44. Харьков, 1981. 31 с.

5. Калюжный В.Н., Немов В.В. Магнитное поле торсатрона.- Вопросы атомной науки и техники. Сер.:Термоядерный синтез, 1985, вып.2, с. 35.
6. Калюжный В.Н., Немов В.В., Шишкин А.А. Исследование структуры магнитных поверхностей в центральной области магнитных конфигураций трехзаходных стеллараторов и торсатронов. - Препринт ХФТИ АН УССР: ХФТИ 81-42. Харьков, 1981. 30 с.
7. Kalyuzhnyj V.N., Nemov V.V., Shishkin A.A. Compensation of magnetic-surface distortions in the central region of the magnetic configurations of  $l=3$  stellarators and torsatrons. - Nucl. Fusion. 1982. Vol.22. P.347-361.
8. Немов В.В. Об одной возможности расчета градиента функции магнитных поверхностей и связанных с ним величин. - Препринт ХФТИ АН УССР: ХФТИ 87-2. Харьков, 1987. 11 с.
9. Немов В.В. О расчете градиента функции магнитных поверхностей и тока равновесия в торсатронах. - Препринт ХФТИ АН УССР: ХФТИ 87-33. Харьков, 1987. 6 с.
10. Nemov V.V. Calculations of the magnetic surface function gradient and associated quantities in a torsatron.- Nucl. Fusion. 1988. Vol.28. P.1727.
11. Nemov V.V. An investigation of Pfirsch-Schluter currents in an  $l=2$  torsatron. - Nucl. Fusion. 1990. Vol.30. P.927.
12. Nemov V.V. Investigation of plasma equilibrium currents in a Drakon-type trap. - 16-th Europ. Conference on Controlled Fusion and Plasma Phys. Venice, 1989. Vol. 13B. Part II. P.599.
13. Немов В.В. Исследование плазменных токов равновесия в ловушке ДРАКОН. - Физика плазмы, 1990. Т.16. С.288.
14. Калюжный В.Н., Немов В.В. Исследование токов равновесия в трехзаходном торсатроне. Препринт ХФТИ 90-7. - Харьков: ХФТИ 1990.-23 с.
15. Kalyuzhnyj V.N., Nemov V.V. Study of plasma equilibrium currents in an  $l=3$  torsatron.-17th European Conf.on Cont. Fus. and Plasma Heating, Amsterdam (1990),Part II,p. 525.
16. Kalyuzhnyj V.N., Nemov V.V. Study of plasma equilibrium currents in the Uragan-2M torsatron.- Collection of papers presented at the IAEA Technical Committee Meeting, 8th Stellarator Workshop, Kharkov, 1991, IAEA, Vienna (1991) 305.

17. Немов В.В. Процессы переноса в стеллараторах в режиме частых столкновений частиц. - Препринт ХФТИ АН УССР: ХФТИ 90-8. Харьков, 1990. 15 с.
18. Nemov V.V. Calculation of transport processes in the Pfirsch-Schluter regime in stellarators.- Nucl. Fusion. 1992. Vol.32. P.597.
19. Немов В.В. Расчеты критерия устойчивости Мерсье в стеллараторах.- Препринт ХФТИ 91-44. Харьков: ХФТИ, 1991.-16с.
20. Гудблуд Г.П., Немов В.В., Шишкин А.А. Исследование неоклассической диффузии в тороидальных системах с пространственной магнитной осью.- Ж. Техн. Физики. 1973. Т.43. С.1609-1619. Goodblood I.P., Nemov V.V., Shishkin A.A. Neoclassical diffusion in a toroidal system with a three-dimensional magnetic axis.- Sov. Phys.- Tech. Phys., February 1974. Vol.18, No.8. P.1016-1021.
21. Немов В.В., Шишкин А.А. Неоклассическая диффузия в тороидальном трехзаходном магнитном поле.- Физика плазмы, 1975. Т.1. С.563-568.
22. Nemov V.V. Neoclassical diffusion in traps with a helical magnetic axis.- Nucl. Fusion. 1977. Vol.17. P.101.
23. Kalyuzhnyj V.N., Kryukov A.V., Nemov V.V. Neoclassical diffusion in helical solenoids.- Nucl. Fusion. 1978. Vol.18. P.1483-1488.
24. Kalyuzhnyj V.N., Nemov V.V. The banana drift regime of neoclassical diffusion in helical solenoids. - Nucl. Fusion. 1984. Vol.24. P.85-90.
25. Немов В.В. Влияние запаздывания релаксации функции распределения на процессы переноса в стеллараторах при редких соударениях частиц.- Письма в ЖТФ, 1984. Том 10, вып.2. С.717.
26. Немов В.В. Влияние запаздывания релаксации функции распределения на диффузию и теплопроводность ионов в стеллараторах.- Вопросы атомной науки и техники. Сер.:Термоядерный синтез, 1984, вып.4, с.30-33.

Подписано в печать 28.09.93. Формат 60x84/16. Офсетная печать.  
Усл.п.л. 1,9. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 110. Заказ № 367.

---

Харьков-108, ротاپронт ННЦ ХФТИ.

464333

AB 28.936

**AB 28.936**