

Иванов Иван Борисович

**Линейная кинетическая модель
взаимодействия
резонансных магнитных возмущений
с плазмой токамака**

01.04.08 – физика плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Гатчина — 2008

Работа выполнена в Отделении теоретической физики
Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН.

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук
Касилов Сергей Валентинович,

доктор физико-математических наук, профессор
Сёменов Владимир Семенович.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Рожанский Владимир Александрович,

доктор физико-математических наук, профессор
Еркаев Николай Васильевич.

Ведущая организация:

Институт ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт".

Защита состоится 4 декабря 2008 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу:
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан 31 октября 2008 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

А. М. Красильщиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая диссертация посвящена построению линейной кинетической модели взаимодействия резонансных магнитных возмущений с плазмой токамака, а также её применению для интерпретации результатов экспериментов по исследованию воздействия внешних низкочастотных резонансных магнитных возмущений на плазму в токамаках TEXTOR (Jülich, Germany) и DIII-D (San Diego, USA).

Актуальность темы. Проблема взаимодействия внешних низкочастотных аксиально несимметричных возмущений магнитного поля с плазмой является важной задачей в проблеме управляемого термоядерного синтеза. В токамаках такие возмущения создаются либо специально, как в случае экспериментов с эргодическими диверторами или с катушками контроля МГД неустойчивостей, либо возникают из-за неизбежных малых нарушений осевой симметрии основной магнитной системы. Резонансными магнитными возмущениями называются такие возмущения магнитного поля, фаза которых постоянна вдоль любой магнитной силовой линии на некоторой рациональной магнитной поверхности, также называемой резонансной.

Одним из первых токамаков, на котором исследовалось влияние внешних резонансных магнитных возмущений на плазму, был токамак PULSATOR, где наблюдалось подавление МГД-неустойчивостей и заметное увеличение времени удержания плазмы при включённых катушках возмущений [1].

Концепция эргодического дивертора (лимитера) была предложена в работах [2, 3, 4] и реализована на нескольких установках, например TEXT, Tore-Supra, JFT-2M и других. В данном методе контроля процессов на краю плазмы при помощи внешних резонансных магнитных возмущений создаётся слой эргодического магнитного поля, в результате чего происходит усиление радиального переноса частиц на стенку, возникает экранировка примесей, вылетающих со стенок, а также ряд других эффектов. Концепция эргодического дивертора получила развитие на установках CSTN-IV, НУВТОК-II, а также токамаке TEXTOR с Динамическим Эргодическим Дивертором (ДЭД), на которых проводятся исследования взаимодействия плазмы с вращающимися резонансными магнитными возмущениями и, в частности, их влияния на вращение плазмы и стабильность МГД-неустойчивостей.

В теоретических исследованиях и моделировании переноса тепла и частиц в эргодических диверторах используется, как правило, модель магнитного поля в виде суперпозиции равновесного аксиально симметричного магнитного поля в токамаке и поля возмущения в вакууме [5, 6]. При таком рассмотрении пренебрегается обратным воздействием токов отклика плазмы на резонансные магнитные возмущения. Это воздействие, в особенности для переменных во времени возмущений, может быть весьма значительным [7, 8, 9],

и поэтому его следует принимать во внимание при моделировании.

В приложении к динамическому эргодическому дивертору, установленном на токамаке TEXTOR, проблема проникновения вращающихся резонансных магнитных возмущений в плазму исследовалась различными методами, в частности с помощью простой резистивной модели [10], различных линейных [11, 12] и нелинейных МГД моделей [13, 14]. Результаты первых экспериментальных измерений вращения плазмы, вызванного полем возмущения ДЭД [15, 16], оказались отличными от теоретических предсказаний упрощённых моделей, в которых направление ускорения плазмы ожидалось в направлении вращения поля возмущения. В частности, на частотах поля до 1 кГц, при которых проводились эксперименты, генерация тороидального вращения плазмы полем ДЭД происходила в направлении тока плазмы и не зависела от направления вращения магнитного поля ДЭД. Более того, даже статическое поле ДЭД создавало вращение плазмы в том же направлении. В результате авторы экспериментов сделали вывод, что в наблюдаемом явлении "...присутствует эффект, отличный от прямого резонансного взаимодействия между полем и плазмой", и для интерпретации экспериментов был предложен другой механизм, связанный с формированием на периферии плазмы под действием возмущения слоя эргодического магнитного поля [15, 16]. В таком магнитном поле из-за усиления переноса электронов по радиусу создается положительное электрическое поле, которое и приводит к изменению вращения плазмы даже для статических возмущений. Причиной расхождения теории и эксперимента являлось использование в упрощённых моделях простого закона Ома, не учитывающего градиент давления электронов.

Резонансные магнитные возмущения, создаваемые внешними катушками, могут оказывать воздействие на различные МГД неустойчивости плазмы [17]. Одним из наиболее актуальных таких приложений резонансных магнитных возмущений в токамаках с полоидальным дивертором является подавление неустойчивости на границе плазмы первого типа (ELM type I), которая в реакторе ИТЭР будет приводить к недопустимой импульсной тепловой нагрузке на стенку и быстрому её износу. Этот метод был предложен и успешно реализован на токамаке DIII-D, где в режиме редких соударений недавно было достигнуто полное подавление ELM'ов под действием резонансных магнитных возмущений малой амплитуды [18, 19]. Было обнаружено, что за счёт эргодизации магнитных силовых линий происходит падение плотности электронов и ионов, и градиент давления плазмы в области пьедестала уменьшается ниже порога возбуждения ELM'ов [20]. При этом не происходит значительного ухудшения параметров удержания плазмы в H-режиме, в частности, удерживаемая энергия плазмы уменьшается всего на 10%.

В теоретических исследованиях эргодизации магнитного поля и вызываемого ею усиленного переноса тепла в токамаке DIII-D [21, 22] использовалось вакуумное поле возмущения. В этих работах было показано, что топология

магнитного поля сильно меняется под действием внешних возмущений. Пространственное перераспределение потока тепла на диверторе под действием этих возмущений, наблюдавшееся экспериментально, находится в качественном согласии с рассчитанным трёхмерным распределением температуры вне сепаратрисы [22]. В то же время проведённое моделирование переноса тепла показало значительный эффект возмущений на температуру как в области пьедестала, так и в центральной области плазмы. Однако в экспериментах такого влияния возмущений на центральную область плазмы обнаружено не было. Наиболее вероятным объяснением этого факта может служить эффект экранировки поля возмущения токами плазмы, возникающими под действием этого возмущения.

Экспериментальные и теоретические исследования низкочастотных магнитных резонансных возмущений также важны для понимания влияния на удержание плазмы полей ошибок, которые неизбежно присутствуют в реальных установках. Такие возмущения могут существенно ухудшить удержание энергии, вызывая образование магнитных островов в результате пересоединения магнитных силовых линий. Обычно такое пересоединение сильно подавлено естественным тороидальным вращением плазмы в токамаке [23]. Однако если амплитуда полей ошибок превосходит некоторое значение, то происходит внезапная остановка вращения и сильное проникновение поля в плазму с разрушением удержания [8, 24].

Теоретическое описание проникновения резонансных магнитных возмущений в плазму обычно основывается на одно- или двухжидкостной магнитной гидродинамике [25, 26, 8, 27, 23, 28, 9, 24]. В этих работах в большинстве случаев использовались геометрия плоского слоя, а также либо простой, либо обобщённый закон Ома, в котором учитывался градиент давления электронов [7, 9, 24]. Использование обобщённого закона Ома при рассмотрении неустойчивости тиринг-моды позволяет получить результаты, наиболее близкие к результатам кинетической теории тиринг-моды [29, 30]. Поэтому следует ожидать, что результаты работ [7, 9, 24], использующих обобщённый закон Ома, будут достаточно адекватно описывать проникновение резонансных магнитных возмущений в плазму. Тем не менее, если температура ионов не предполагается малой по сравнению с температурой электронов, даже двухжидкостная гидродинамика выходит за рамки своей применимости [31], поскольку предсказывает радиальный масштаб изменения возмущённых параметров вблизи резонансной магнитной поверхности (в резонансном слое) значительно меньший, чем ларморовский радиус ионов.

Таким образом, разработка кинетической модели для описания проникновения резонансных магнитных возмущений в плазму современных токамаков в настоящее время является актуальной темой.

Целью настоящей работы является построение линейной кинетической модели взаимодействия резонансных магнитных возмущений с плазмой токамака. Основной задачей моделирования является расчёт распределения электромагнитного поля низкочастотных магнитных возмущений в плазме, а также вычисление крутящих моментов сил, воздействующих на плазму со стороны поля возмущения. С помощью этих результатов необходимо исследовать влияние возмущений на топологию магнитного поля и вращение плазмы для интерпретации результатов экспериментов по изучению воздействия внешних резонансных магнитных возмущений на плазму в токамаках TEXTOR (Jülich, Germany) и DIII-D (San Diego, USA).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Вычисление в рамках кинетической теории с использованием переменных действие-угол и τ -приближения для учёта столкновений частиц нелокального дифференциального оператора проводимости плазмы токамака методом разложения по ларморовскому радиусу, а в тороидальном случае и по периодическому отклонению радиальной координаты дрейфовой орбиты от среднего значения.
2. Построение математической модели, описывающей проникновение внешних резонансных магнитных возмущений в плазму токамака в приближении прямого периодического неоднородного плазменного цилиндра с вращательным преобразованием магнитного поля и использующей в уравнениях Максвелла полученную плотность тока плазмы в первом порядке разложения по ларморовскому радиусу.
3. Численное моделирование взаимодействия вращающегося магнитного поля динамического эргодического дивертора с плазмой токамака TEXTOR.
4. Утверждение, что обращение в ноль поглощаемой мощности и крутящих моментов, действующих на плазму со стороны поля возмущения, происходит не точно на нулевой частоте поля в системе покоя электронной жидкости, как предсказывается МГД моделями, а на частоте, сдвинутой в общем случае на величину, пропорциональную радиальному градиенту температуры электронов.
5. Утверждение, что различные объяснения наблюдаемого в экспериментах ускорения вращения плазмы как (1) результата резонансного поглощения плазмой импульса возмущающего поля и как (2) результата изменения радиального электрического поля не противоречат друг другу и являются различными интерпретациями одного и того же явления.
6. Численное моделирование проникновения магнитного поля возмущения I-катушек в токамаке DIII-D для параметров плазмы и магнитного поля, соответствующих разряду 126006.

Научная новизна:

1. В рамках кинетической теории в переменных действие-угол предложен специальный метод разложения оператора проводимости плазмы в токамаке по ларморовскому радиусу, а в тороидальном случае и по периодическому отклонению радиальной координаты дрейфовой орбиты от среднего значения, сохраняющий фундаментальные свойства точного оператора проводимости, важные для моделирования взаимодействия низкочастотных резонансных магнитных возмущений с плазмой. Использование автоматических аналитических вычислений (MAPLE) позволяет удерживать в плотности тока все члены, возникающие в данном порядке разложения.
2. Разработанная кинетическая модель применялась для численного моделирования и интерпретации результатов экспериментов на токамаке TEXTOR. В частности, был объяснён неожиданный эффект независимости изменения вращения плазмы от направления вращения поля возмущения катушек ДЭД.
3. Разработанная кинетическая модель применялась для численного моделирования и интерпретации результатов недавних экспериментов на токамаке DIII-D. В частности, был обнаружен эффект сильной экранировки внешнего поля возмущения токами отклика плазмы, согласующийся с измеренным в эксперименте поведением плотности и температуры плазмы под действием возмущения.
4. Произведено сравнение результатов кинетического моделирования проникновения поля возмущения в плазму и предсказаний МГД теории, которое показало возможность значительных отличий результатов кинетической теории от последних вариантов линейной дрейфовой МГД теории.
5. Новым результатом кинетической модели по сравнению с МГД моделями является пропорциональный радиальному градиенту температуры электронов сдвиг частоты поля возмущения (относительно частоты статического возмущения в системе покоя электронной компоненты), при которой происходит обращение в ноль поглощаемой мощности.

Практическая ценность. Построенная кинетическая модель учитывает нелокальный отклик плазмы на магнитные возмущения и может быть использована для моделирования взаимодействия возмущений с плазмой в современных токамаках с высокой температурой плазмы, в том числе и в реакторе ИТЭР. С помощью данной модели были успешно интерпретированы результаты недавних экспериментов на токамаках TEXTOR и DIII-D.

Предложенный и реализованный в случае цилиндрической геометрии метод получения дифференциального оператора проводимости плазмы позволяет автоматически строить разложения произвольного порядка по ларморовскому радиусу, что представляет значительный интерес для учёта эффектов конечного ларморовского радиуса частиц на проникновение магнитных возмущений в плазму. Выражения для оператора проводимости также могут быть использованы в диапазоне высоких частот, включая диапазон ионных циклотронных частот. Метод получения оператора проводимости может быть применён для вычисления плотности тока плазмы в тороидальной геометрии, поскольку основные полученные выражения и свойства справедливы в общем случае, когда невозмущённое движение частиц является интегрируемым.

Личный вклад автора. Изложенные в диссертации результаты получены автором на равных правах с соавторами или самостоятельно.

Апробация работы. Полученные в работе результаты докладывались на четырёх международных конференциях:

1. Stochasticity in Fusion Plasmas, March 15–17, 2005, Jülich, Germany.
2. 32nd EPS Plasma Physics Conference, 27 June – 1 July, 2005, Tarragona, Spain.
3. 33rd EPS Plasma Physics Conference, June 19–23, 2006, Rome, Italy.
4. Stochasticity in Fusion Plasmas, March 05–07, 2007, Jülich, Germany.

Публикации. По теме диссертации опубликованы три статьи в научных рецензируемых журналах и две статьи в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти основных глав, заключения и списка литературы из 96 наименований, содержит 159 страниц текста, включая 44 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель работы, основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая ценность работы, кратко изложено содержание работы.

Вторая глава посвящена получению и исследованию свойств нелокального дифференциального оператора проводимости плазмы в канонических переменных действие-угол методом разложения по ларморовскому радиусу.

Окончательные выражения получены в приближении прямого периодического неоднородного плазменного цилиндра с вращательным преобразованием магнитного поля.

После введения (параграф 2.1), в параграфе 2.2, плотность тока возмущения в линейном приближении записана в виде, удобном для дальнейших вычислений.

В параграфе 2.3 в канонических переменных действие-угол, используя разложения в ряд Фурье по каноническим углам, получено решение кинетического уравнения с учётом столкновений частиц в τ -приближении.

В параграфе 2.4 плотность тока возмущения записывается в переменных действие-угол в виде интеграла по всему фазовому пространству с дельта-функцией. После подстановки решения кинетического уравнения для возмущения функции распределения выводится общее выражение для плотности тока возмущения в линейном приближении в переменных действие-угол. Для перехода от интегральной к дифференциальной зависимости плотности тока от поля возмущения делается специальное однородное разложение по ларморовскому радиусу, а в тороидальном случае и по периодическому отклонению радиальной координаты дрейфовой орбиты от среднего значения. Предложенный способ разложения плотности тока плазмы обеспечивает сокращение особенности при нулевой частоте поля возмущения в каждом порядке разложения, а также неотрицательность поглощаемой мощности поля возмущения в плазме в случае термодинамически равновесной бoльцмановской функции распределения частиц.

В параграфе 2.5 рассматривается получение переменных действие-угол в случае цилиндрической геометрии с точностью до членов второго порядка разложения по ларморовскому радиусу включительно. Выводятся соотношения, связывающие старые цилиндрические (r, ϑ, z) переменные с новыми переменными (ϕ, ϑ_g, z_g) , где угол ϕ имеет смысл гирофазы, ϑ_g есть азимут и z_g есть z -координата ведущего центра частицы.

Общие выражения для плотности тока в цилиндрической геометрии получены в параграфе 2.6, их структура, а также число линейно независимых колебаний в данной модели плазмы рассматриваются в параграфе 2.7. Показано, что для плазмы в неоднородном поле число линейно независимых колебаний в нашей модели равно $6N - 2$, где N – порядок разложения по ларморовскому радиусу.

Параграф 2.8 посвящён вопросу о ковариантности полученной плотности тока относительно преобразований Галилея в движущуюся систему отсчёта. Показано, что благодаря использованию специального однородного разложения (порядка N) не нарушается инвариантность поперечных (к относительной скорости движения системы отсчёта) компонент плотности тока, а члены, нарушающие ковариантность продольной компоненты, имеют порядок малости $(N + 1)$ и не содержат слагаемых с резонансным знаменателем.

В параграфе 2.9 в переменных действие-угол получено выражение для полной поглощаемой мощности поля возмущения в плазме для произвольной функции распределения в бесстолкновительном случае, которое понадобится в дальнейшем для объяснения эффекта воздействия поля возмущения на вращение плазмы. Для полученной плотности тока плазмы произведено разбиение поглощаемой мощности на мощность локальной диссипации энергии и плотность кинетического потока, а также рассмотрен закон сохранения энергии электромагнитного поля.

Третья глава посвящена изложению различных аспектов численной кинетической модели проникновения магнитных возмущений в плазму в цилиндрической геометрии.

После введения, в параграфе 3.2, описываются детали аналитического вычисления оператора проводимости.

В параграфе 3.3 рассматривается вопрос о равновесии плазмы с заданными профилями давления и запаса устойчивости и согласованное вычисление параметров равновесной функции распределения. В частности, получены выражения для основных моментов функции распределения с точностью до членов первого порядка разложения по ларморовскому радиусу и выписана система уравнений для нахождения параметров функции распределения каждого сорта частиц.

В параграфе 3.4 для одной пространственной Фурье-гармоники возмущения система уравнений Максвелла с плотностью тока плазмы, вычисленной в произвольном порядке разложения по ларморовскому радиусу в цилиндрической геометрии, сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений по радиальной переменной для Фурье-амплитуд поля возмущения. В однородном и неоднородном случаях рассматривается проблема выбора набора независимых неизвестных функций и определяется число фундаментальных решений (независимых волновых колебаний) данного уравнения.

В параграфе 3.5 обсуждается задание граничных условий в центре и на металлической стенке цилиндра, а также условия сшивки решений на антенне, где задана поверхностная плотность тока, генерирующая электромагнитные возмущения в плазме.

Параграф 3.6 посвящён описанию алгоритма численного решения полученной жёсткой системы уравнений Максвелла, описывающей проникновение поля в плазму.

В параграфе 3.7 описывается тестирование полученной системы уравнений для случая однородной плазмы в однородном магнитном поле при помощи сравнения решений уравнения дисперсии в различных порядках разложения по ларморовскому радиусу с точными кривыми, полученными прямым поиском нулей определителя дисперсионного уравнения с точным тензором проводимости однородной горячей плазмы в однородном поле.

В параграфе 3.8 приводится уравнение идеальной магнитной гидроди-

намики из теории тиринг-моды, которое можно использовать для описания распространения магнитных возмущений в области вне резонансной поверхности. В следующей главе решения этого уравнения будут использоваться для сопоставления с результатами расчетов в кинетической модели.

В **четвёртой главе** в параграфе 4.2 выводится общая связь между поглощаемой мощностью поля возмущения, крутящим моментом и силой Лоренца, действующими на плазму со стороны поля возмущения, которая понадобится нам в дальнейшем для интерпретации результатов кинетического моделирования.

В параграфе 4.3 выводится выражение для поглощаемой мощности поля в низшем порядке разложения по ларморовскому радиусу, которое описывает основные закономерности расчётных кривых поглощаемой мощности и крутящего момента в зависимости от частоты поля возмущения. Обсуждается механизм резонансного поглощения энергии в случае наличия градиентов у функции распределения.

В параграфе 4.4 на основе квазилинейного уравнения для плотности частиц выводится выражение для тороидального крутящего момента и показывается, что механизм вращения, основанный на процессе переноса плазмы в области эргодизации магнитного поля, на самом деле согласуется с механизмом резонансного поглощения энергии и импульса возмущающего поля.

В параграфе 4.5 на основе усреднённой по магнитной поверхности ковариантной тороидальной компоненты уравнений движения электронов и ионов производится оценка изменения скорости тороидального вращения плазмы под действием поля возмущения.

В **пятой главе** разработанная нами численная кинетическая модель применяется для расчёта проникновения резонансных магнитных возмущений динамического эргодического дивертора в плазму токамака TEXTOR (Jülich, Germany).

В параграфе 5.1 выводится Фурье-спектр плотности тока антенны динамического эргодического дивертора для разных режимов работы антенны.

В параграфе 5.2 приводятся типичные в условиях эксперимента равновесные радиальные профили параметров плазмы, а также магнитного и электрического полей.

В параграфе 5.3 излагаются основные результаты кинетического моделирования, а также их соответствие результатам МГД моделирования и эксперимента.

В **шестой главе** разработанная нами численная кинетическая модель применяется для расчёта проникновения резонансных магнитных возмущений I-катушек в плазму токамака DIII-D (San Diego, USA).

В параграфе 6.1 приводятся и обсуждаются равновесные радиальные профили параметров плазмы, а также магнитного и электрического полей, соответствующие разряду 126006.

Параграф 6.2 посвящён описанию результатов моделирования проникновения резонансных магнитных возмущений в плазму. Результаты расчёта форм-факторов, являющихся отношением поля возмущения в плазме к полю возмущения в вакууме, сравниваются с их значениями в дрейфовой МГД теории. Также обсуждаются кривые тороидального крутящего момента, действующего на плазму (в зависимости от тороидальной скорости плазмы) и возможные сценарии раскрутки плазмы. Раздел заканчивается анализом применимости линейной модели в данных условиях эксперимента.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. В рамках линейной кинетической теории с использованием переменных действие-угол и τ -приближения для учёта столкновений частиц вычислен нелокальный дифференциальный оператор проводимости плазмы токамака методом разложения по ларморовскому радиусу, а в тороидальном случае и по периодическому отклонению радиальной координаты дрейфовой орбиты от среднего значения. Полученный оператор проводимости для произвольного порядка разложения удовлетворяет условиям неотрицательности поглощаемой мощности электромагнитного поля в плазме с термодинамически равновесной функцией распределения Больцмана, а также ковариантности резонансной части плотности тока по отношению к преобразованиям Галилея в движущуюся систему отсчёта (в бесстолкновительном случае).
2. Разработана численная математическая модель, описывающая проникновение внешних резонансных магнитных возмущений в плазму токамака в приближении прямого периодического неоднородного плазменного цилиндра с вращательным преобразованием магнитного поля и использующая в уравнениях Максвелла плотность тока плазмы, вычисленную в первом порядке разложения по ларморовскому радиусу.
3. Аналитически, а также в численном моделировании взаимодействия вращающегося магнитного поля Динамического Эргодического Дивертора (ДЭД) с плазмой токамака TEXTOR показано, что наблюдаемое в экспериментах отсутствие зависимости направления ускорения плазмы от направления вращения поля ДЭД (ускорение всегда направлено в сторону равновесного тока плазмы) связано с тем, что использованные частоты ω вращения поля ДЭД не превосходили частоты ω_r , при которой крутящий момент, приложенный к плазме со стороны поля возмущения, изменяет знак.
4. В кинетическом рассмотрении получено, что изменение знака крутящих моментов, действующих на плазму со стороны поля возмущения, происходит не точно на нулевой частоте поля в системе покоя электрон-

ной компоненты, как предсказывается МГД моделями, а на частоте ω_r , сдвинутой в общем случае на величину, пропорциональную радиальному градиенту электронной температуры.

5. Показано, что различные объяснения наблюдаемого в экспериментах ускорения вращения плазмы как (1) результата резонансного поглощения плазмой импульса возмущающего поля и как (2) результата изменения радиального электрического поля, вызванного эргодизацией магнитного поля и соответствующим усилением радиального переноса электронов, не противоречат друг другу и являются различными интерпретациями одного и того же явления. Как следствие, для ускорения плазмы не требуется создание слоя эргодического магнитного поля и достаточно возмущения поля в виде одной пространственной гармоники, приводящей к образованию отдельной цепочки островов.
6. В результате численного моделирования проникновения магнитного поля возмущения I-катушек в плазму токамака DIII-D для реальных параметров плазмы и магнитного поля в разрядах с большой длиной свободного пробега частиц в области пьедестала показано, что из-за эффекта экранировки токами плазмы влияние возмущения на магнитные поверхности и, как следствие, на перенос тепла и частиц в центральной области плазмы мало (ширина островов, образуемых такими экранированными возмущениями, уменьшается в 10 раз по сравнению с шириной островов для вакуумного поля возмущения). В результате, в отличие от вакуумного приближения, образование слоя эргодического магнитного поля ограничено областью шириной порядка одного сантиметра вблизи невозмущённой сепаратрисы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. On the interaction of a rotating magnetic field with the plasma in the kinetic approximation / M. F. Heyn, I. B. Ivanov, S. V. Kasilov, W. Kernbichler // 32nd EPS Conf. on Plasma Phys. and Contr. Fusion, Tarragona, 27 June – 1 July 2005, ECA / Ed. by C. Hidalgo, B. P. van Milligen. — Vol. 29C. — Mulhouse: European Physical Society, 2005. — Pp. P-2.020.
2. Kinetic modeling of the interaction of rotating magnetic fields with a radially inhomogeneous plasma / M. F. Heyn, I. B. Ivanov, S. V. Kasilov, W. Kernbichler // *Nuclear Fusion*. — 2006. — Vol. 46, no. 3. — Pp. S159–S169.
3. Linear and quasilinear modeling of ded induced plasma rotation / M. F. Heyn, I. B. Ivanov, S. V. Kasilov, W. Kernbichler // 33rd EPS Conf. on Plasma Phys., Rome, 19-23 June 2006, ECA / Ed. by F. De Marco, G. Vlad. — Vol. 30I. — Mulhouse: European Physical Society, 2006. — Pp. P-4.174.

4. О связи вращения плазмы под действием низкочастотных резонансных магнитных возмущений с переносом в эргодических магнитных полях / И. Б. Иванов, С. В. Касилов, W. Kernbichler, M. Heyn // *Письма в ЖЭТФ*. — 2007. — Т. 86, № 6. — С. 420–423.
5. Kinetic estimate of the shielding of resonant magnetic field perturbations by the plasma in DIII-D / M. F. Heyn, I. B. Ivanov, S. V. Kasilov, W. Kernbichler, I. Joseph, R. A. Moyer, A. M. Runov // *Nuclear Fusion*. — 2008. — Vol. 48, no. 2. — p. 024005.

Список литературы

1. Influence of resonant helical fields on tokamak discharges / F. Karger, H. Wobig, S. Corti et al. // Proc. 5th IAEA Int. Conf. on Plasma Phys. Control. Fusion (Tokyo, 1974). — Vienna: IAEA, 1975. — Pp. 207–213.
2. *Engelhardt, W.* Influence of an ergodic magnetic limiter on the impurity content in a tokamak / W. Engelhardt, W. Feneberg // *J. Nucl. Mater.* — 1978. — Vol. 76–77. — Pp. 518–520.
3. *Feneberg, W.* A helical magnetic limiter for boundary layer control in large tokamaks / W. Feneberg, G. H. Wolf // *Nucl. Fusion*. — 1981. — Vol. 21. — Pp. 669–676.
4. *Samain, A.* Plasma motion and purification in an ergodic divertor / A. Samain, A. Grosman, W. Feneberg // *Journal of Nuclear Materials*. — 1982. — Vol. 111–112. — Pp. 408–412.
5. Overview of magnetic structure induced by the TEXTOR-DED and the related transport / S. S. Abdullaev, K. H. Finken, M. W. Jakubowski et al. // *Nuclear Fusion*. — 2003. — Vol. 43. — Pp. 299–313.
6. Monte Carlo study of heat conductivity in stochastic boundaries: Application to the TEXTOR ergodic divertor / A. Runov, D. Reiter, S. V. Kasilov et al. // *Physics of Plasmas*. — 2001. — Vol. 8, no. 3. — Pp. 916–930.
7. *Fitzpatrick, R.* The interaction of resonant magnetic perturbations with rotating plasmas / R. Fitzpatrick, T. C. Hender // *Phys. Fluids B*. — 1991. — Vol. 3, no. 3. — Pp. 644–673.
8. *Fitzpatrick, R.* Bifurcated states of a rotating tokamak plasma in the presence of a static error-field / R. Fitzpatrick // *Phys. Plasmas*. — 1998. — Vol. 5, no. 9. — Pp. 3325–3341.
9. *Waelbroeck, F. L.* Shielding of resonant magnetic perturbations in the long mean-free path regime / F. L. Waelbroeck // *Phys. Plasmas*. — 2003. — Vol. 10, no. 10. — Pp. 4040–4047.

10. *Finken, K. H.* Perturbation field penetration into the textor tokamak and the resulting torque / K. H. Finken // *Nuclear Fusion*. — 1999. — Vol. 39, no. 6. — Pp. 707–723.
11. Modelling of the field line penetration and force transfer by the dynamic ergodic divertor of textor / K. H. Finken, S. S. Abdullaev, M. Jakubowski et al. // *Nuclear Fusion*. — 2004. — Vol. 44, no. 5. — Pp. S55–S63.
12. Investigation of plasma response influence on the penetration of an external low frequency helical perturbation into a tokamak edge plasma / I. M. Pankratov, A. Y. Omelchenko, V. V. Olshansky, K. H. Finken // *Nuclear Fusion*. — 2004. — Vol. 44, no. 5. — Pp. S37–S43.
13. The comparison of the penetration of running and standing waves into a plasma with resonance surface / V. Zhukov, H. de Blank, M. Kobayashi, I. Schwab // *Phys. Plasmas*. — 2004. — Vol. 11, no. 4. — Pp. 1459–1468.
14. *Zhukov, V. P.* The interaction of the external magnetic field with a tokamak plasma / V. P. Zhukov, K. H. Finken // *Nuclear Fusion*. — 2004. — Vol. 44, no. 5. — Pp. S44–S54.
15. Toroidal plasma rotation induced by the dynamic ergodic divertor in the textor tokamak / K. H. Finken, S. S. Abdullaev, M. F. M. de Bock et al. // *Phys. Rev. Letters*. — 2005. — Vol. 94. — P. 015003.
16. The dynamic ergodic divertor in the textor tokamak: plasma response to dynamic helical magnetic field perturbations / K. H. Finken, S. S. Abdullaev, W. Biel et al. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2004. — Vol. 46. — Pp. B143–B155.
17. Effect of the dynamic ergodic divertor in the textor tokamak on mhd stability, plasma rotation and transport / R. C. Wolf, W. Biel, M. F. M. de Bock et al. // *Nuclear Fusion*. — 2005. — Vol. 45. — Pp. 1700–1707.
18. Suppression of large edge-localized modes in high-confinement dIII-d plasmas with a stochastic magnetic boundary / T. E. Evans, R. A. Moyer, P. R. Thomas et al. // *Phys. Rev. Letters*. — 2004. — Vol. 92, no. 23. — Pp. 235003–1–4.
19. Edge stability and transport control with resonant magnetic perturbations in collisionless tokamak plasmas / T. E. Evans, R. A. Moyer, K. H. Burrell et al. // *Nature Phys.* — 2006. — Vol. 2, no. 6. — Pp. 419–423.
20. Elm suppression in low edge collisionality h-mode discharges using $n = 3$ magnetic perturbations / K. H. Burrell, T. E. Evans, E. J. Doyle et al. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. — 2005. — Vol. 47, no. 1. — Pp. B37–B52.

21. Experimental and numerical studies of separatrix splitting and magnetic footprints in diiii-d / T. E. Evans, I. Joseph, R. A. Moyer et al. // *Journ. of Nuclear Materials.* — 2007. — Vol. 363–365. — Pp. 570–574.
22. Stochastic transport modeling of resonant magnetic perturbations in diiii-d / I. Joseph, R. A. Moyer, T. E. Evans et al. // *Journ. of Nuclear Materials.* — 2007. — Vol. 363–365. — Pp. 591–595.
23. *Boozer, A. H.* Shielding of resonant magnetic perturbations by rotation / A. H. Boozer // *Phys. Plasmas.* — 1996. — Vol. 3, no. 12. — Pp. 4620–4627.
24. *Cole, A.* Drift-magnetohydrodynamical model of error-field penetration in tokamak plasmas / A. Cole, R. Fitzpatrick // *Phys. Plasmas.* — 2006. — Vol. 13, no. 3. — P. 032503.
25. *Jensen, T. H.* A simple model for driven islands in tokamaks / T. H. Jensen, A. W. Leonard, A. W. Hyatt // *Phys. Fluids B.* — 1993. — Vol. 5, no. 4. — Pp. 1239–1247.
26. *Fitzpatrick, F. L.* Effect of a static external magnetic perturbation on resistive mode stability in tokamaks / F. L. Fitzpatrick, T. C. Hender // *Phys. Plasmas.* — 1994. — Vol. 1, no. 10. — Pp. 3337–3355.
27. *Hurricane, O. A.* Two-dimensional magnetohydrodynamic simulation of a flowing plasma interacting with an externally imposed magnetic field / O. A. Hurricane, T. H. Jensen, A. B. Hassam // *Physics of Plasmas.* — 1995. — Vol. 2, no. 6. — Pp. 1976–1981.
28. *Boozer, A. H.* Error field amplification and rotation damping in tokamak plasmas / A. H. Boozer // *Phys. Rev. Letters.* — 2001. — Vol. 86, no. 22. — Pp. 5059–5061.
29. *Drake, J. F.* Kinetic theory of $m=1$ internal instabilities / J. F. Drake // *Phys. Fluids.* — 1978. — Vol. 21, no. 10. — Pp. 1777–1789.
30. Unified theory of tearing modes / S. M. Mahajan, R. D. Hazeltine, H. R. Strauss, D. W. Ross // *Phys. Fluids.* — 1978. — Vol. 22, no. 11. — Pp. 2147–2156.
31. *Scott, B.* Two-dimensional fast reconnection in a fluid drift model / B. Scott, F. Porcelli // *Phys. Plasmas.* — 2004. — Vol. 11, no. 12. — Pp. 5468–5474.