

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. Иоффе РАН

На правах рукописи

Молчанов Павел Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ  
СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАКА МАСТ

Специальность: 01.04.08-физика плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
Кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Рожанский Владимир Александрович,  
кафедра физики плазмы ГОУ «СПбГПУ»

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Лукаш Виктор Эммануилович,  
ИЯС РНЦ «Курчатовский институт»

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Гусаков Евгений Зиновьевич,  
ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Ведущая организация – Санкт Петербургский Государственный Университет

Защита состоится “\_\_” \_\_\_\_\_ г. в “\_\_” на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при Физико-Техническом институте им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.26.

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

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета,  
Канд. физ-мат. наук

А.М. Красильщиков

### Актуальность темы

В настоящее время общепризнанно, что электрические поля и дрейфовые потоки в пристеночной плазме играют определяющую роль в глобальном удержании плазмы в установках для термоядерного синтеза и определяют переход в режим улучшенного удержания плазмы. Известно, что дрейфы в областях, где плазма контактирует со стенкой, приводят к перераспределению потоков плазмы и примесей, влияют на тороидальное вращение плазмы и могут менять тепловую нагрузку на элементы конструкции установки [11,12].

В силу сложности и разнообразия физических процессов, определяющих самосогласованное электрическое поле и скорости дрейфовых потоков в пристеночной плазме, их описание невозможно без численного моделирования. Существовавшие до сих пор численные коды [13-17] не обеспечивали самосогласованного моделирования режима улучшенного удержания. Поэтому таких расчетов, несмотря на то, что этот режим является основным для существующих больших установок и ITER, до сих пор не было. Таким образом, моделирование режима улучшенного удержания (H-режима) является актуальной задачей.

Спонтанная генерация тороидального вращения в центральной плазме, в отсутствии передачи тороидального момента (в отсутствии нейтральной инжекции), – это один из наиболее интересных эффектов, наблюдаемых в последние годы на многих современных токамаках. Эта ситуация будет реализовываться и в токамаке–реакторе ITER. Механизм спонтанной генерации в центральной области полностью неясен – это один из центральных вопросов в физике плазмы токамаков. Существуют указания, такие как, например, зависимость центрального тороидального вращения от диверторной конфигурации, на то, что тороидальное вращение создается в обдирочном слое и затем переносится в центр. Поэтому систематическое исследование тороидального вращения и его параметрической зависимости в пристеночной области является актуальным.

Недавно в экспериментах с прикладыванием внешних резонансных магнитных возмущений (RMP) для подавления эльмов был обнаружен ряд новых эффектов. Это генерация сонаправленного с током тороидального вращения, рост электрического поля (от отрицательного к положительному), “эффект откачки” (pump-out). Все они являлись непонятными до недавнего времени. Такие магнитные катушки запланированы или уже установлены во всех больших токамаках и ITER. Впервые модель, описывающая все эти эффекты самосогласованно, была встроена в код

B2SOLPS5.2 [5]. Таким образом, моделирование этих эффектов и сравнение с экспериментальными данными является актуальной задачей.

Примеси используются в методе Доплеровской спектроскопии для измерения тороидальных и полоидальных скоростей вращения и радиального электрического поля в окрестности сепаратрисы. Исследование распределения примесей и их скоростей важно для правильной интерпретации данных диагностики. Для сферического токамака до сих пор таких моделирований проведено не было. Таким образом, моделирование поведения примесей в реальном разряде на сферическом токамаке является актуальным.

### **Цель данной работы**

Расчет параметров пристеночной плазмы для реальной геометрии сферического токамака MAST. Выяснение физических механизмов формирования параллельной скорости и электрических полей и их зависимостей от остальных параметров в пристеночной плазме в L и H – режимах. Исследование поведения коэффициентов переноса и остальных параметров плазмы в режиме улучшенного удержания с граничным транспортным барьером в сферическом токамаке. Моделирование эффектов, вызванных внешними резонансными магнитными возмущениями, и сравнение с экспериментальными данными для сферического токамака MAST в L и H - режимах. Исследование концентраций и скоростей движения примесей гелия в режиме улучшенного удержания.

### **Научная новизна результатов работы**

1. С помощью кода B2SOLPS5.2 впервые проведено систематическое моделирование параллельной скорости в пристеночной плазме сферического токамака MAST с учетом самосогласованных электрических полей в L и H - режимах. Впервые предложен скейлинг зависимости параллельной скорости в обдирочном слое от параметров плазмы. Обнаружена линейная зависимость параллельной скорости от отношения температуры к величине полоидального магнитного поля.

2. Впервые проведено моделирование режимов улучшенного удержания с граничным транспортным барьером для сферического токамака MAST. Обнаружено, что существует сильный барьер для концентрации, при котором коэффициент диффузии

падает на порядок, и очень слабый барьер для температуры – коэффициент теплопроводности падает только в 2 раза.

3. Впервые проведено моделирование эффектов генерации сонаправленного с током тороидального вращения, роста электрического поля (от отрицательного к положительному), “эффекта откачки” (pump-out), наблюдаемых в экспериментах с прикладыванием внешних резонансных магнитных возмущений (RMP) на сферическом токамаке MAST в H-режиме. Новая модель, описывающая стохастические эффекты, введенная в код B2SOLPS5.2, удовлетворительно описывает экспериментальные данные в H-режиме.

4. Впервые обнаружено сильное экранирование вакуумного магнитного поля в плазме в экспериментах с созданием внешних резонансных магнитных возмущений (RMP).

5. При расчете конфигураций с внешними резонансными магнитными возмущениями (RMP) на сферическом токамаке MAST в L-режиме обнаружено, что для согласия с экспериментальными данными необходимо увеличить аномальные коэффициенты переноса, что является указанием на увеличение уровня турбулентности в этих разрядах.

6. Впервые проведено моделирование H-режима с примесью гелия на сферическом токамаке MAST. Обнаружена сильная асимметрия между стороной сильного и слабого поля в распределении ионов гелия и сильное отличие их скоростей от скорости основного компонента плазмы. Выяснено, что существует большая добавка к скоростям примесей в противотоковом направлении.

#### **Достоверность научных результатов**

Достоверность научных выводов обусловлена применением адекватных математических методов, сопоставлением результатов моделирования с упрощенными аналитическими моделями, согласованностью с экспериментальными данными, с результатами гидродинамического моделирования других авторов и с результатами моделирования методом Монте-Карло.

#### **Научно-практическое значение результатов работы**

Результаты работы могут быть использованы для анализа зависимостей характеристик пристеночной плазмы токамаков от параметров разряда и для проектирования новых токамаков, в том числе для проектирования токамака-реактора

ITER. В частности, выполненные исследования позволяют предсказать величину скорости тороидального вращения, электрического поля, характеристики транспортного барьера и отклика плазмы на резонансные магнитные возмущения в пристеночной плазме токамаков. Выполненные исследования распределения примесей существенны для диагностики плазмы методом Доплеровской спектроскопии.

**На защиту выносятся следующие научные положения**

1. Систематическое исследование зависимости параллельной скорости в обдирочном слое от параметров плазмы в L и H - режимах. Скейлинг зависимости параллельной скорости от локальных параметров плазмы.
2. Расчет состояния плазмы диверторного сферического токамака с учетом самосогласованных электрических полей и токов в режиме улучшенного удержания в широком диапазоне параметров. Обнаружение сильного падения коэффициента диффузии внутри периферийного транспортного барьера в сферическом токамаке MAST и слабого падения коэффициента электронной температуропроводности. Вывод о том, что профили радиального электрического поля и тороидального вращения в H-режиме с периферийным транспортным барьером и в L-режиме существенно не отличаются.
3. Моделирование пристеночной плазмы в присутствии резонансных магнитных возмущений. Обнаружение эффектов изменения радиального электрического поля (появление слагаемого противоположного знака), раскрутки плазмы ионным радиальным током в направлении тока в токамаке и экранирования резонансных магнитных возмущений плазмой. Интерпретация “эффекта откачки” (rimr-out) в присутствии резонансных магнитных возмущений как появления дополнительно потока ионов, вызванного неоклассическим током ионов. Обнаружение эффекта увеличения турбулентных коэффициентов переноса в L-режиме с малой плотностью.
4. Моделирование распределения концентраций и скоростей примесей гелия в режиме улучшенного удержания сферического токамака MAST. Обнаружение сильной полоидальной асимметрии в распределении ионов гелия между стороной сильного и слабого магнитного поля и большого отличия параллельных скоростей примесей от Пфирш-Шлютеровских значений.

## **Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, и изложена на 126 страницах, содержит 156 рисунков.

### **Краткое изложение содержания диссертации**

Во Введении определяется положение рассматриваемой проблемы в рамках задач управляемого термоядерного синтеза и физики плазмы. Дается краткий обзор экспериментальных результатов и общий обзор предшествовавших работ.

Глава 1 представляет собой обзор литературы. Перечислены экспериментальные данные, связанные с параллельной скоростью, L-N переходом, измерением потоков и электрических полей в пристеночной плазме токамаков. Рассмотрены существующие численные модели пристеночной плазмы токамаков и основные результаты, полученные с их помощью. Перечислены основные аналитические подходы к проблеме описания пристеночной плазмы, формирования электрических полей в ней, и перехода в режим улучшенного удержания. Рассмотрены эксперименты с созданием внешних резонансных возмущений магнитного поля. Описаны наблюдаемые эффекты и существующие модели. Описаны аналитические модели формирования потоков и распределения примесей и экспериментальные наблюдения в H-режиме.

В Главе 2 приводится описание системы уравнений для расчетов пристеночной плазмы с учетом самосогласованных электрических полей. За основу взяты гидродинамические уравнения Брагинского. Бездивергентная часть диамагнитных потоков частиц, тепла и импульса исключена из уравнений, что обеспечивает возможность их корректного и эффективного численного решения уравнений. Дивергентная часть уравнений, совпадающая с вкладом в дивергенцию потоков, соответствующих тороидальному дрейфу ведущих центров, учтена. Для этого, в частности, были скомбинированы дивергенция конвективного потока импульса, связанного с тороидальным дрейфом, и слагаемые в уравнении баланса сил, связанные с кривизной. Для моделирования H-режима в уравнениях большие радиальные конвективные потоки частиц и энергии были заменены на полоидальные потоки с той же дивергенцией [1].

Поперечные коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности заменены аномальными значениями. Это необходимо для адекватного описания радиальных потоков в плазме токамака, которые определяются аномальным переносом. Уравнения

преобразованы для использования в двухмерном коде (предполагается симметрия вдоль тороидальной координаты), в котором за основу координатной сетки взяты магнитные поверхности. Согласованно решаются уравнение неразрывности для ионов и для тока, суммарный продольный баланс сил для ионов и электронов, уравнения теплового баланса для ионов и для электронов. Поперечные составляющие баланса сил используются для определения в явном виде дрейфовых и диффузионных потоков частиц и токов. Приведены выражения для поперечных токов в пристеночной плазме, включая токи, связанные с продольной и поперечной вязкостью, инерцией, столкновениями с нейтральными атомами. Слагаемые уравнений записываются в криволинейных ортогональных координатах, метрические коэффициенты которых предполагаются заданными. В конце главы описаны граничные условия, устанавливаемые на внутренней и внешней границах численной сетки, стенках установки и пластинах на концентрацию частиц, температуру, их потоки, потоки тепла и токи. Условия на внутренней границе соответствуют экспериментальным профилям температуры, концентрации и мощности, вкладываемой в разряд. Условия на пластинах соответствуют обычным условиям в слое, с учетом дрейфов, рециклинга и откачки частиц.

В Главе 3 приведены результаты моделирования параметрической зависимости скорости параллельного вращения плазмы в пристеночной области для токамаков MAST и ASDEX Upgrade.

В разделе 3.1 приведены результаты моделирования. Приведена характерная структура сетки и области моделирования для геометрии с двумя X-точками, характерной для токамака MAST, и геометрии с одной X-точкой, характерной для токамака ASDEX Upgrade. Приведены результаты расчетов, в которых в выбранных базовых разрядах менялись параметры плазмы – концентрация, тороидальное и полоидальное магнитное поле, температура. Обнаружена сильная зависимость от температуры и полоидального поля для двух токамаков. Видна характерная Пфирш-Шлютеровская модуляция скорости вращения. Электрическое поле в центральной области соответствует неоклассическому, а в обдирочном слое (SOL) оно пропорционально электронной температуре.

Лабораторные измерения показывают, что в омических разрядах рост плотности вызывает соответствующие падение температуры, рост тока токамака вызывает рост температуры и т.д. Таким образом, для точного выяснения параметрической зависимости были смоделированы реальные омические разряды специальной экспериментальной кампании на MAST [18] из повторяющихся сценариев с меняющейся плотностью и

плазменным током, созданных для систематического исследования пространства параметров плазмы. Во всех разрядах была получена сонаправленная с током (отрицательная) параллельная скорость и при моделировании и в эксперименте. Измерения проводились на внешнем обводе со стороны слабого поля.

В разделе 3.2 проводится обсуждение полученных результатов. Указывается, что возможно выделить 3 вклада в параллельные потоки, которые близки к тороидальным. Первый вклад - это Пфирш-Шлютеровский поток, который возникает для замыкания вертикального  $\nabla B$ - дрейфа ионов. Второй поток - это поток, компенсирующий  $\vec{E} \times \vec{B}$  дрейф в радиальном электрическом поле для сохранения полоидального потока, который был без дрейфов.

И, наконец, есть несбалансированный поток, который не связан с дрейфами и направлен к пластинам в придиверторной области. В обдирочном слое (SOL) он часто направлен от внешних пластин к внутренним из-за большого радиального потока через внешнюю часть тора и температурной асимметрии на пластинах (внешние пластины горячее). Эта аналитическая модель подтверждается результатами численного моделирования, когда дрейфы были выключены. Из-за вязкого взаимодействия эти параллельные потоки переносятся через сепаратрису. Схема потоков приведена на рис.1.

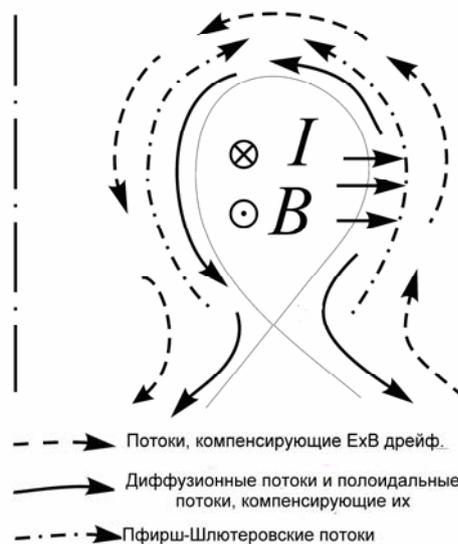


Рис.1. Схема параллельных потоков в обдирочном слое (SOL).

Таким образом, параллельную скорость можно описывать формулой, представляющей собой сумму первых двух слагаемых.

$$V_{\parallel}^{MODEL} = V_{\parallel}^{PS} + V_{\parallel}^E \quad (1)$$

Сложно предсказать параметрическую зависимость несбалансированного параллельного потока (не связанного с дрейфами). Напротив, другие части параллельного потока, скорости которых даются аналитическими выражениями, могут быть проанализированы. Полученная в численном эксперименте зависимость скорости от параметров плазмы соответствует модельной формуле. В то же время, несмотря на соответствие параметрической зависимости, наблюдается отличие по величине между параллельной скоростью рассчитанной в коде и по модельной формуле. На основании модельного выражения предложена скейлинговая зависимость для параллельной скорости:

$$V_{\parallel} = A \frac{T_i}{B_x}, \quad (2)$$

где  $A$  константа,  $T_i$  - средняя ионная температура в SOL,  $B_x$ -полоидальное магнитное поле.

Данные моделирования хорошо соответствуют этой зависимости для L и H-режимов, рис.2-3.

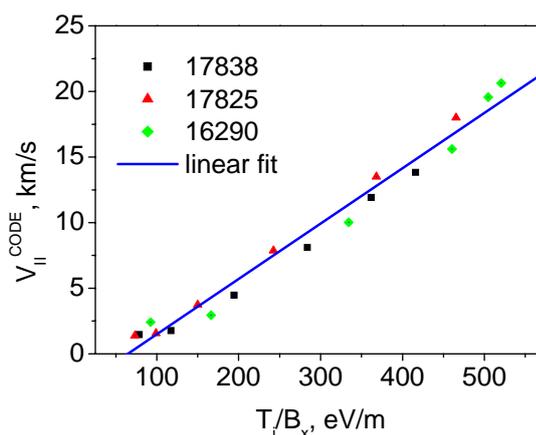


Рис.2. Абсолютное значение смоделированной параллельной скорости  $V_{\parallel}^{CODE}$  как функции отношения ионной температуры к полоидальному магнитному полю для омических сценариев №17838, №17825, №16290, взятых на внешнем обводе с расстояний от 1 до 5 см снаружи от сепаратрисы. Коэффициент  $A$  в уравнении (2) равен 0.027.

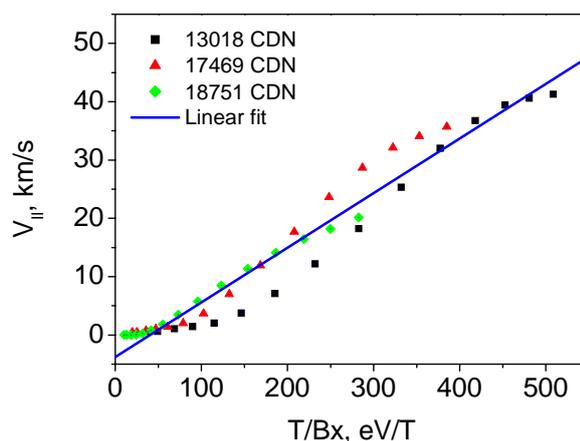


Рис.3. Абсолютное значение смоделированной параллельной скорости  $V_{\parallel}^{CODE}$  как функции отношения ионной температуры к полоидальному магнитному полю для CDN H-mode разрядов №13018, №17469, №18751, взятых на внешнем обводе с расстояний от 1 до 14 см снаружи от сепаратрисы. Коэффициент  $A$  в уравнении (2) равен 0.083.

В разделе 3.3 проводится сравнение с экспериментальными данными. Измерения зондами Маха [18] подтверждают сделанный вывод о характере зависимости параллельной скорости (параллельного числа Маха). Форма радиального профиля числа Маха согласуется с полученной в работе, но абсолютное значение в эксперименте оказывается больше. Экспериментальные точки также соответствуют предложенному скейлингу, рис.4.

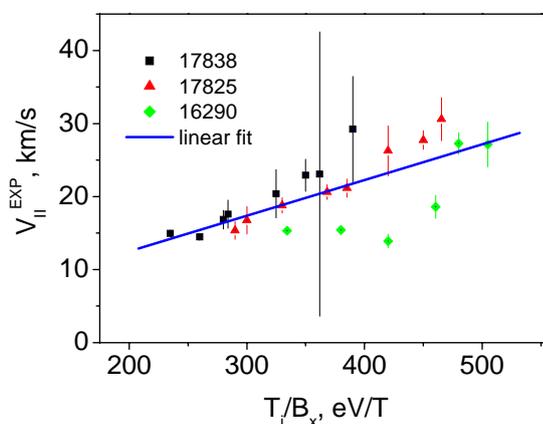


Рис.4. Абсолютное значение экспериментальной параллельной скорости  $V_{\parallel}^{EXP}$  как функция отношения ионной температуры к полоидальному магнитному полю для сценариев №17838, №17825, №16290, взятое на внешнем обводе с расстояний от 1 до 5 см снаружи от сепаратрисы. Коэффициент  $A$  в уравнении (2) равен 0.05.

В разделе 3.4 суммированы результаты, полученные в главе 3.

В Главе 4 описывается моделирование H-режима с периферийным транспортным барьером на сферическом токамаке MAST.

В разделе 4.1 приведены результаты моделирования. Для изучения свойств режима улучшенного удержания (H-режим) моделировались реальные разряды с токамака MAST с разными концентрациями частиц, температурами и геометрией магнитного поля с дрейфами и без, а также с добавочным моделированием распределения нейтральных атомов методом Монте-Карло. Результаты сравнивались с экспериментальными данными.

В разделе 4.2 проводится обсуждение полученных результатов. Несмотря на такие различные параметры разрядов, описание экспериментальных профилей оказывается возможным при задании коэффициентов переноса с одинаковыми барьерами. Величина падения аномальных коэффициентов переноса в барьере сильно различается. Существует сильный барьер для концентрации – коэффициент диффузии падает в 10 раз, а для электронной температуры его практически нет – коэффициент электронной теплопроводности падает только в 2 раза в барьере. Такое отличие в падении коэффициентов переноса может быть связано с существованием в плазме электронной температурно-градиентной неустойчивости, которая и не дает сильно упасть коэффициенту электронной теплопроводности.

Из примеров моделирования с дрейфами и без дрейфов видно, что радиальные профили концентрации и температуры полностью определяются коэффициентами переноса и могут быть смоделированы без учета дрейфов. Видно, что моделирование с гидродинамической моделью для нейтральных частиц и с кодом Eirene, более точно моделирующей распределение нейтральных атомов и молекул методом Монте-Карло, дает одинаковые радиальные профили концентрации и температуры. Полученное значение  $E \times B$  шира рядом с сепартрисой на внешнем обводе  $\sim 10^8 \text{ c}^{-1}$  значительно превышает предположительно необходимое для достижения H - режима значение  $10^5 \text{ c}^{-1}$ . Характер поведения скорости тороидального вращения и радиального электрического поля такой же, как и в L-режиме, но абсолютные величины намного больше. Радиальное электрическое поле совпадает с неоклассическим значением в центральной области. Неплохое соответствие экспериментальных и расчетных профилей различных величин на внешнем обводе и на пластинах подтверждает правильность полученных профилей для коэффициентов переноса в режиме улучшенного удержания с граничным транспортным барьером.

В разделе 4.3 суммированы результаты, полученные в главе 4.

В Главе 5 описывается моделирование эффектов, вызванных резонансными магнитными возмущениями.

В разделе 5.1 приведены результаты моделирования для H-режима. Код B2SOLPS5.2 был модифицирован для учета явлений, связанных со стохастическими магнитными

полями. В частности был исследован механизм “эффекта откачки” (pump-out). Модель описывает эффекты, связанные с внешними магнитными резонансными возмущениями и вызванные модификацией амбиполярного электрического поля, при движении электронов по стохастическим силовым линиям магнитного поля. Приведены результаты исследования на основании базового расчета H-режима на MAST, в котором менялась величина стохастической проводимости возникающего электронного тока (уравнение 3) и изучалась величина возникающих эффектов.

Плотность радиального электронного тока в стохастическом магнитном поле дается простым выражением [5] ( $y$  – безразмерная радиальная координата,  $h_y$  – метрический коэффициент) :

$$j_e = \sigma_{st} \left( E_y + \frac{T_e}{e} \frac{d \ln n}{h_y dy} + 0.5 \frac{T_e}{e} \frac{d \ln T_e}{h_y dy} \right). \quad (3)$$

Коэффициент 0.5 здесь соответствует бесстолкновительному пределу.  $\sigma_{st}$  – стохастическая проводимость. Ток (3) добавлен в уравнение непрерывности для тока  $\nabla \cdot \vec{j} = 0$ , которое решается в коде B2SOLPS5.2. В уравнение теплового баланса электронов включена также дополнительная теплопроводность в стохастическом магнитном поле.

Для моделирования ширина стохастического слоя была выбрана равной ширине транспортного барьера. Для того, чтобы смоделировать плотность и температуру на пьедестале суммарный поток частиц из центра, электронный и ионный тепловые потоки сохранялись постоянными при моделировании со стохастичностью и без нее.

Сильное падение плотности в области пьедестала соответствует “эффекту откачки” (pump-out) наблюдаемому при моделировании. При приближении стохастической проводимости  $\sigma_{st}$  к уровню  $10^{-2}$  См/м плотность на пьедестале практически перестает меняться – достигается насыщение. Электронная температура несильно меняется при включении стохастичности. При приближении к  $\sigma_{st} 10^{-2}$  См/м радиальное электрическое поле становится практически нулевым (от исходно сильно отрицательного), хотя еще и отрицательным в области барьера. Падение радиального электрического поля по абсолютной величине приводит к меньшим значениям шира. Его величина падает на порядок и дальнейшая эргодизация может даже вызвать H-L переход. Параллельная скорость при включении стохастичности становится более отрицательной. При дальнейшем увеличении  $\sigma_{st}$  радиальное электрическое поле становится положительным во всей области на внешнем обводе и перестает значительно меняться, как и остальные величины.

При моделировании реальных экспериментов лучшее согласие с экспериментом было достигнуто при величине стохастического коэффициента диффузии магнитных силовых линий  $D_{St} = 1.1 \cdot 10^{-7} m$ , соответствующем стохастической проводимости  $5 \cdot 10^{-3} \text{ См/м}$ . Это значение коэффициента диффузии магнитных силовых линий оказывается в 4 раза меньше рассчитанного кодом ERGOS для вакуумных возмущений магнитного поля. Это может быть указанием на сильное экранирование вакуумного магнитного поля плазмой.

В разделе 5.2 приведены результаты моделирования для L-режима. При моделировании использовалась такая же ширина стохастического слоя, как и в H-режиме. Были проведены моделирования с различными значениями стохастической проводимости  $\sigma_{St}$ . Даже при очень больших значениях  $\sigma_{St}$  получающийся при моделировании “эффект откачки” (pump-out) был довольно слабым, хотя электрическое поле и параллельная скорость меняются заметно, относительно их исходных значений. Увеличение ширины стохастического слоя также не приводило к его увеличению. Малый “эффект откачки” (pump-out) согласуется с моделью, т.к. неоклассический ток пропорционален градиентам температуры и концентрации и поэтому должен быть мал в омическом разряде (L-режиме). Слабый “эффект откачки” (pump-out) наблюдался на DIII-D в то время, как для MAST он довольно большой. Чтобы добиться согласия с экспериментальными данными пришлось увеличить турбулентный коэффициент диффузии в случае со стохастическим слоем, что соответствует предположению об увеличении уровня турбулентности в плазме при эргодизации магнитного поля. На данный момент физическая причина, которая должна приводить к увеличению аномального коэффициента диффузии при включении внешних резонансных возмущений магнитного поля, неясна. В то же время, в эксперименте наблюдается увеличение уровня флуктуаций плотности при включении резонансных магнитных возмущений, что указывает на возрастание коэффициентов переноса. Экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются, в том числе электрическое поле и числа Маха.

Раздел 5.3 содержит выводы, сделанные по главе 5.

В Главе 6 описывается исследование распределения примесей гелия в H-режиме с периферийным транспортным барьером.

В разделе 6.1 приведены результаты моделирования и их обсуждение. Для понимания физики распределения ионов примеси и их переноса вблизи сепаратрисы и в обдирочном слое (SOL) было выполнено моделирование с помощью кода B2SOLPS5.2. Был выбран разряд в H-режиме, где проводились активные измерения с инжекцией He. Известно, что распределение примесей в плазме сильно отличается от стандартной

неоклассики [19]-[20] при наличии больших градиентов плотности [21] даже в отсутствие турбулентного переноса и источников. При моделировании особенно сильная асимметрия концентрации ионов примеси наблюдалась между внутренним и внешним обводом. Было обнаружено сильное отличие в скоростях ионов примеси и основных ионов плазмы.

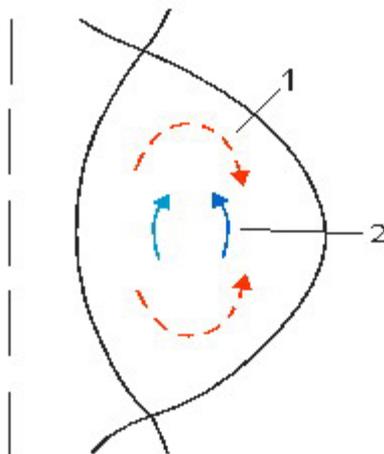


Рис.5 Полоидальная проекция параллельных потоков  $\text{He}^{+2}$ . 1- поток, вызванный градиентом давления, 2-поток, вызванный термосилой.

Полученные результаты интерпретируются на основании анализа уравнения для параллельного момента и уравнения неразрывности для ионов примеси. Картина возникающих потоков приведена на рис.5.

Результаты моделирования согласуются с противотоковым вращением ионов примеси, измеренным в эксперименте.

Выводы из главы 6 даны в разделе 6.2.

В Заключении приведены основные результаты диссертации.

#### **Основные результаты полученные в диссертации:**

1. Моделирование кодом B2SOLPS5.2 воспроизводит экспериментально наблюдаемое сонаправленное с током вращение плазмы в омических разрядах на стороне слабого поля в экваториальной плоскости в SOL.
2. Скорость параллельного вращения слабо зависит от плотности плазмы и тороидального магнитного поля.
3. Абсолютное значение скорости параллельного вращения растет с ростом температуры.
4. Абсолютное значение скорости параллельного вращения падает с ростом тока (полоидального магнитного поля).

5. Параметрическая зависимость скорости параллельного вращения близка к параметрической зависимости Пфирш-Шлютеровской параллельной скорости и параллельной скорости компенсирующей дрейфы в скрещенных электрических и магнитных полях.
6. Параметрическая зависимость параллельной скорости согласуется предложенным в работе скейлингом (формула 3.4).
7. В сферическом токамаке MAST в режимах улучшенного удержания обнаружено сильное падение коэффициента диффузии в барьере (до 10 раз), в то время как коэффициент температуропроводности электронов падает значительно слабее (до 2 раз). Другими словами, барьер по электронной температуре практически отсутствует.
8. Характер поведения радиального электрического поля и тороидального вращения в H-режиме с периферийным транспортным барьером не отличается существенно от их поведения в L-режиме. В частности радиальное электрическое поле близко к неоклассическому, а скорость тороидального вращения на внешнем обводе близка к Пфирш-Шлютеровской и совпадает с направлением тока. Абсолютные же величины существенно превышают соответствующие значения в L-режиме.
9. Показано, что падение плотности является результатом самосогласованного перераспределения радиальных потоков в плазме в амбиполярном электрическом поле меняющимся из-за ухода электронов вдоль стохастических магнитных силовых линий.
10. Предсказывается, что радиальное электрическое поле должно становиться более положительным при появлении стохастического слоя.
11. Предсказывается раскручивание плазмы ионным радиальным током в направлении по току.
12. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными в H-режиме на MAST и показывают, что существует сильное экранирование вакуумных возмущений магнитного поля.
13. Слабый “эффект откачки” (pump-out) предсказывается для L – режима, что находится в качественном согласии с данными с DIII-D, но противоречит результатам с MAST для низких плотностей. Сильный “эффект откачки” (pump-out) для L – режима на MAST может быть интерпретирован как увеличение турбулентных коэффициентов переноса.

14. При моделировании обнаружена сильная асимметрия между стороной сильного и слабого поля в распределении ионов гелия в области граничного транспортного барьера.
15. Полученные параллельные скорости ионов примеси сильно отличаются от Пфирш-Шлютеровских.
16. Продемонстрировано, что на стороне слабого поля скорости ионов примеси получают значительную составляющую в противотоковом направлении относительно скорости основных ионов.

### **Апробация работы и публикации**

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Результаты диссертационной работы докладывались на международных научных конференциях (33rd EPS Conference on Plasma Phys. Rome, 19 - 23 June 2006; 17th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei Anhui, China, May22-26, 2006, 18th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Toledo Spain, May26-30, 2008), 35<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Phys., Hersonissos Crete 9-13 June 2008, 37<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Phys., Dublin 21-25 June 2010, 4<sup>th</sup> International workshop on stochasticity in fusion plasma Julich Germany, March 2-4 2009), на всероссийских конференциях (III Курчатовская молодежная научная школа, Москва, 14 – 16 ноября 2005 г.), на семинарах Института физики плазмы им. Макса Планка, Гаршинг, Германия, Калэмского Центра Термоядерной Энергии, Великобритания, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), СПбГПУ(Санкт-Петербург).

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных работах (Список публикаций):**

1. V. Rozhansky, E. Kaveeva, P. Molchanov, I. Veselova, S. Voskoboynikov, D. Coster, G. Counsell, A. Kirk, S. Lisgo, the ASDEX-Upgrade Team and the MAST Team. New B2SOLPS5.2 transport code for H-mode regimes in tokamaks. // Nucl. Fusion 49 (2009) 025007 (11pp)
2. V. Rozhansky, E. Kaveeva, P. Molchanov, I. Veselova, S. Voskoboynikov, D. Coster, G. Counsell, A. Kirk, S. Lisgo, ASDEX-Upgrade Team. Simulations of H-modes discharges in ASDEX-Upgrade and MAST // Journal of Nuclear Materials v.390-391 (2009) 408–411 (5p)
3. V. Rozhansky, P. Molchanov, S. Voskoboynikov, G. Counsell, A. Kirk, D. Coster, R. Schneider. Modeling of the parametric dependence of the edge toroidal rotation for MAST and ASDEX Upgrade. // Journal of Nuclear Materials v.363-365 (2007) 464–468 (5p)

4. P. Molchanov, V. Rozhansky, S. Voskoboynikov, S. Tallents, G. Counsell and A. Kirk. Comparison of measured and simulated parallel flows at the edge plasma of MAST. // Plasma Phys. Control. Fusion 50 (2008) 115010 (8pp)
5. V. Rozhansky, E. Kaveeva, P. Molchanov, I. Veselova, S. Voskoboynikov, D. Coster, A. Kirk, S. Lisgo and E. Nardon. Modification of the edge transport barrier by resonant magnetic perturbations. // Nucl. Fusion 50 (2010) 034005 (7pp)
6. В. Рожанский, П. Молчанов, С. Воскобойников. Моделирование параметрической зависимости тороидального вращения в пристеночной области. //Физика плазмы, 2008, том 34, № 9, с.791-797.
7. H. Meyer, Y. Andrew, P. G. Carolan, G. Cunningham, A. R. Field, A. Kirk, P. Molchanov, V. Rozhansky, S. Voskoboynikov, and the MAST and NBI Teams, Active control of the H-mode transition on MAST Plasma Phys. Control. Fusion 50 (2008) 015005
8. H. Meyer, Y. Andrew, P. G. Carolan, G. Cunningham, A. R. Field, A. Kirk, P. Molchanov, V. Rozhansky, S. Voskoboynikov, and the MAST and NBI Teams, Active control of the H-mode transition on MAST. //33rd EPS Conference on Plasma Phys. Rome, 19 - 23 June 2006 ECA Vol.30I, O-2.006 (2006).
9. P. Molchanov, V. Rozhansky, S. Voskoboynikov, S. Tallents, G. Counsell, A. Kirk Comparison of measured and simulated parallel flows at the edge plasma of MAST, Proc.35th EPS Conf. on Contr. Fus. and Plasma Phys. v. 32D (2008) P4.035
10. P. Molchanov, V. Rozhansky, S. Voskoboynikov, A. Kirk, H. Meyer, D. Coster Modeling of He distribution in the edge plasma of MAST, Proc.37th EPS Conf. on Contr. Fus. and Plasma Phys. (2010) P2.190

#### **Список литературы, цитируемой в автореферате**

11. Chankin A.V., Classical drifts in the tokamak SOL and divertor: models and experiment // Journal of Nuclear Materials, **241-243**(1997) p.199-213
12. Braams B. J., Radiative divertor modelling for ITER and TPX // Contributions to Plasma Physics, **36** 2/3 (1996) p.276-281
13. V. Rozhansky et al., Impact of Magnetic Configuration on Edge Radial Electric Field: MAST-ASDEX Upgrade Simulation with B2SOLPS5.0// 32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, ECA Vol.29C, P-2.017 (2005)
14. Rognlien T.D., Ryutov D.D., Mattor N., Calculation of 2-D profiles for the plasma and electric field near a tokamak separatrix // Czechoslovak Journal of Physics **48**(1998) p.201
15. Radford G. J., Chankin A. V., Corrigan G. *et al.*, The particle and heat drift fluxes and their implementation into the EDGE2D transport code // Contributions to Plasma Physics **36** 2/3 (1996) p.187-191.

16. Gerhauser H., Zagórski R., Claasen H. A., Lehnen M., Calculation of 2D profiles for the plasma and electric field in the boundary layer of the TEXTOR-94 Tokamak // Journal of Nuclear Materials 290-293 (2001) p.609-614.
17. X.Q. Xu., Theoretical and modeling issues relevant to the L-H transition// 10th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers.St.Petersburg, Russia (2005)
18. S. Tallents, G.F Counsell, M.Price, SOL-Flows investigations the Mega Ampère Spherical Tokamak (MAST) using the new MAST Gundestrup probe //17th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, Hefei Anhui, China, May22-26, 2006
19. P. H. Rutherford Phys. Fluids 17 (1974) 1781
20. I. Kaganovich and V. Rozhansky, Phys. Plasmas 5 3901 (1998)
21. V. Rozhansky Sov. Journ. Plasma Phys. 5 (1979) 771 ; 6 (1980) ; 10 (1984) 254