

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Е.Г.Кавеевой «Механизмы поперечной проводимости в плазме токамака и резонансные магнитные возмущения» представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

Диссертация посвящена актуальной проблеме описания комплекса процессов при развитии в плазме токамака слоя стохастического магнитного поля и необходимого для понимания этих процессов механизма поперечной (радиальной) проводимости в токамаке. Стохастизация магнитного поля в токамаке может происходить как спонтанно, при развитии МГД неустойчивостей, так и благодаря внешним возмущениям, связанным с отклонением внешнего магнитного поля от тороидальной симметрии. Внешние возмущения магнитного поля в целом ряде экспериментов целенаправленно создаются с помощью внешних катушек. Такие возмущения содержат ряд гармоник в разложении в ряд Фурье, создающих магнитные острова на рациональных магнитных поверхностях вблизи границы плазмы. Происходит стохастизация магнитного поля в этой области, и это сопровождается целым рядом экспериментально наблюдаемых явлений. Основной целью создания стохастического слоя внешними катушками является модификация H-режима в токамаке, при которой исчезают периодически развивающиеся крупномасштабные МГД неустойчивости в области транспортного барьера (ELMs, Edge Localized Modes). Эти неустойчивости приводят к недопустимым для термоядерного реактора локальным выбросам энергии, поэтому токамак-реактор ИТЭР планируется оснастить катушками, создающими магнитные возмущения.

Среди явлений, наблюдаемых при стохастизации магнитного поля - изменение радиального электрического поля в плазме, изменение тороидального вращения, возникновение экранирующих токов, изменение градиента концентрации плазмы в транспортном барьере. В диссертации впервые дано согласованное количественное описание всех этих изменений в

плазме, позволяющее не только объяснить существующие эксперименты, но и сделать предсказания для ИТЭР.

В диссертации также рассмотрено влияние механизмов радиальной проводимости плазмы на перенос вещества снаружи сепаратрисы (в SOL).

В **первой главе** дается общий вывод для радиальной проводимости плазмы. Рассмотрены эксперименты на различных токамаках и результаты моделирования, проведенного автором, подтверждающего аналитически описанный механизм проводимости. Модель проводимости требует одновременного учета турбулентного (аномального) радиального переноса тороидального импульса плазмы и продольной классической вязкости, величина которой определяется полоидальным вращением плазмы. Описаны два режима проводимости. В зависимости от параметров проводимость может определяться коэффициентом продольной вязкости, или же эффективным коэффициентом поперечной вязкости, описывающей радиальный турбулентный перенос импульса.

Во **второй главе** предложена аналитическая модель для описания согласованного изменения тороидальной скорости плазмы и радиального электрического поля при возникновении стохастического слоя. Рассматривается баланс тока, связанного с радиальной проводимостью и переносимого ионами, и электронного тока. Последний связан с уходом из плазмы электронов вдоль силовых линий магнитного поля, которые, из-за внешнего возмущения, имеют проекцию на радиальное направление и могут выходить из плазмы на пластины дивертора. В результате баланса этих токов устанавливается электрическое поле среднее между полем, удерживающим в плазме электроны, и направленным из плазмы, и неоклассическим полем, направленным в плазму и удерживающим ионы. Одновременно происходит ускорение плазмы в тороидальном направлении силой Ампера, связанной с током ионов. Самосогласованность описания связана с тем, что тороидальная скорость плазмы входит в выражение для неоклассического электрического поля, а тороидальная сила зависит от ионного тока, пропорционального

отклонению электрического поля от неоклассической формулы. Изменение градиента концентрации в стохастическом слое связано с конвективным переносом ионов и электронов, несущих соответствующие токи. В главе представлено моделирование разрядов с включением электронной проводимости, соответствующей стохастизации магнитного поля, подтверждающее предложенную аналитическую модель и согласующееся с экспериментальными результатами.

В **третьей главе** предложена модель, описывающая экранирующие токи, наблюдаемые в плазме при включении внешних магнитных возмущений. Эти токи связываются с тороидальной проекцией тока электронов при их уходе из плазмы вдоль силовых линий стохастического магнитного поля. Задача снова рассмотрена согласованно, с учетом зависимости уровня стохастизации магнитного поля от его экранирования плазмой и зависимости экранирующего электронного тока от уровня стохастизации магнитного поля. Благодаря самосогласованному подходу удалось объяснить наблюдаемый в эксперименте пороговый уровень резонансных магнитных возмущений, необходимый для их проникновения в плазму.

В **четвертой главе** рассматривается возможность возникновения стохастического слоя в плазме при развитии ELMs. Из эксперимента известно, что при ELMs на границе разряда формируются филаменты, сгустки плазмы, вытянутые вдоль магнитного поля. Филаменты отрываются от основной плазмы и двигаются через SOL наружу с ускорением. Экспериментально зафиксирован электрический ток в филаментах. Рассмотрены возможные причины и порядок величины этого тока, а также динамический процесс формирования стохастического слоя в плазме создаваемым ими магнитным полем. Показано, что для типичных параметров токамака MAST, для которого имеется широкая экспериментальная база связанная с наблюдением филаментов, стохастический слой действительно может формироваться за время жизни филамента. Динамический эффект,

подобный тому, который приводит к уменьшению концентрации в транспортном барьере при внешних магнитных возмущениях, может отвечать за большую часть потери плазмы при развитии ELMs.

В **пятой главе** рассмотрен комплекс явлений, связанных с дрейфовым движением ионов и электронов в SOL. Показано, что конвективный (дрейфовый) перенос ионов в SOL можно оценить с помощью механизма радиальной проводимости, использованного ранее для объяснения переноса ионов в стохастическом слое. Как и в стохастическом слое, в SOL электрическое поле отличается от неоклассического, в то же время продольный ток электронов может замыкаться через пластины дивертора. В современных токамаках ионизация происходит в зоне дивертора, поэтому давление в основной части ближнего SOL на магнитных поверхностях выровнено, и процессы поперечного конвективного переноса близки к тем, которые наблюдаются внутри сепаратрисы. В главе предложена оценка для конвективного потока ионов в SOL и проведено сравнение с результатами моделирования токамака ГЛОБУС-М. Предложена оценка для дрейфовых механизмов переноса энергии электронов.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы

Основные **новые результаты** полученные в работе

- 1) Расширена модель радиальной поперечной проводимости в токамаке
- 2) Предложена модель отклика плазмы на резонансные магнитные возмущения, согласованно описывающая изменение тороидальной скорости, электрического поля, полоидального вращения, радиальных конвективных потоков и магнитного отклика плазмы.

- 3) Предложена модель стохастизации магнитного поля вблизи сепаратрисы при развитии ELMs, и связанных с ней динамических конвективных потоков.

- 4) Предложена модель конвективного переноса ионов и тепла электронов в SOL

Практическая значимость работы определяется ценностью модели для предсказания будущих экспериментов, в том числе в ИТЭР. Поскольку в целом ряде высших учебных заведений, в частности в С.Петербургском госуниверситете, читаются спецкурсы по горячей плазме и управляемому термоядерному синтезу, то материалы диссертации могут быть использованы при чтении этих курсов лекций.

Наряду с несомненными достоинствами можно отметить некоторые недостатки.

1. На Рисунке 3 показаны экспериментальные профили электрического поля в токамаке ASDEX-Upgrade, и делается утверждение, что поле близко к неоклассической величине. В то же время, из рисунка это прямо не следует. Кроме того, на двух рисунках разные размерности электрического поля - в одном случае кВ/м а в другом В/см.
2. На странице 31 говорится об особенностях кода B2SOLPS5.2 и кода SOLPS-ITER. Не вполне понятно, что относится к одному, а что к другому, или же все характеристики верны для обоих кодов.
3. Рисунок 6. Чем можно объяснить несовпадение электрического поля в моделировании и в эксперименте?
4. Почему в балансе сил электронов (1.40) не учтена термосила?
5. В уравнении (1.60) появляется коэффициент η_2 . Это опечатка?
6. Раздел 2.3. Проводимость дается иногда в См/м, а иногда в $\text{м}^{-1} \text{Ом}^{-1}$. Не везде переведены на русский язык размерности величин.

Отмеченные неточности и опечатки не затрагивают основных выводов и результатов диссертации и не влияют на высокий уровень выполненного исследования.

Содержание диссертации соответствует специальности «физика плазмы» 01-04-08. Основные положения и выводы представлены в 13 докладах (в том числе в двух приглашенных докладах) на международных конференциях и опубликованы в 33 статьях в журналах, имеющих достаточно высокий импакт-фактор.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.
Диссертационное исследование Е.Г.Ксавеевой «Механизмы поперечной проводимости в плазме токамака и резонансные магнитные возмущения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Оно выполнено на высоком научном уровне, соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменяющими документами Постановлений Правительства Российской Федерации от 30.07.2014 № 723, от 21.04.2016 № 355, от 02.08.2016 № 748). Автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы».

Официальный оппонент,

д.ф.м.н, профессор,

(01.04.08 физика плазмы)

зав. лабораторией «физики плазмы»

Санкт-Петербургского государственного университета

адрес : Университетский пр. 28, Петродворец, 198504, СПб

тел. : (812) 428-98-02,

e-mail: yu_golubovski@yahoo.com

Ю.Б.Голубовский

Подпись Голубовского Юрия Борисовича заверяю: