

ОТЗЫВ

официального оппонента Жданова Владимира Михайловича на диссертационную работу Кавеевой Елизаветы Геннадьевны на тему «Механизмы поперечной проводимости в плазме токамака и резонансные магнитные возмущения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы»

Диссертация Е.Г. Кавеевой посвящена исследованию физических механизмов, определяющих процессы переноса заряда, частиц и тепла поперек магнитных поверхностей в токамаке при наличии в установке возмущений магнитного поля различного типа.

Как известно, радиальное электрическое поле в токамаке подавляет турбулентность за счет шири скорости вращения плазмы, влияя тем самым на процесс перехода установки в режим с улучшенным удержанием плазмы. Процесс формирования электрического поля при этом определяется широким спектром физических процессов, в том числе стохастизацией картины силовых линий магнитного поля установки под действием возмущений, создаваемых внешними управляющими катушками или развивающихся за счет крупномасштабных неустойчивостей типа ЭЛМов первого рода. В то же время подобные возмущения магнитной конфигурации сами оказываются зависящими от существующих в установке электрических полей и вращения плазмы. Поскольку отмеченные механизмы также оказывают влияние на процессы поперечного переноса вещества и энергии на периферии плазменного шнура токамака, прогнозирование величины этих эффектов является критически важным для успешного создания термоядерного реактора. Тематика диссертационного исследования оказывается несомненно очень актуальной.

Объем диссертации составляет 175 страниц, работа состоит из введения, 5 глав, заключения и приложения. Библиография содержит 115 литературных источников, графические данные представлены на 47 рисунках.

Во **введении** приведен краткий обзор проблем, анализу которых посвящено диссертационное исследование, обосновывается актуальность и степень разработанности выбранной тематики работы. Представлены цели и задачи исследования, основные научные положения, выносимые на защиту. Обсуждаются научная новизна, теоретическая и практическая ценность, достоверность и апробация полученных в ходе работы результатов, личный вклад автора. Приведены сведения о публикациях по тематике работы. Кратко представлены структура и содержание диссертации.

В **первой главе** диссертации рассматривается процесс формирования радиального электрического поля в тороидально симметричной плазме токамака. Представлены основные

положения и выводы теории образования неоклассического радиального электрического поля в токамаке при наличии турбулентных течений плазмы вблизи сепаратрисы установки. Обсуждаются экспериментальные измерения, подтверждающие теоретические выводы, анализируются и сравниваются с данными экспериментов альтернативные модели формирования электрического поля и связанного с ним вращения плазмы. Делается вывод о важности учета аномального, турбулентного характера вязкого переноса импульса в плазме для формирования радиального электрического поля. Приведены результаты выполненного автором моделирования параметров пристеночной плазмы токамаков ASDEX Upgrade, MAST, ITER в коде B2SOLPS, которые сравниваются с имеющимися экспериментальными данными и предсказаниями неоклассической теории. Получены аналитические оценки для поперечной ширины переходного слоя, внутри которого напряженность радиального электрического поля меняется от неоклассического значения до значения в скрэп-слое установки. Обсуждаются вопросы, связанные с изменениями, которые претерпевает структура радиальных плотности тока и напряженности электрического поля при внесении в плазму установки электрода и нарушении условия амбиполярности. Получены выражения для поперечной проводимости и сопротивления плазмы, профили плотности тока, напряженности электрического поля в упрощенной и реальной магнитных геометриях токамака при разных значениях отношений коэффициентов продольной (классической) и поперечной (аномальной) вязкости. Аналитические результаты проверены путем численного моделирования разряда в токамаке ASDEX Upgrade в коде B2SOLPS5.0.

Во **второй главе** автором рассмотрен процесс формирования радиального электрического поля и установления профиля скорости тороидального вращения плазмы при наличии вблизи сепаратрисы слоя стохастизованного магнитного поля. Представлен обзор экспериментальных работ, в которых наблюдалось влияние резонансных магнитных возмущений на установившееся радиальное электрическое поле и связанное с ним вращение плазмы. Получены выражения для напряженности электрического поля, плотности тока, поперечной проводимости и скорости тороидального вращения плазмы внутри стохастического слоя в зависимости от соотношения ряда характерных линейных размеров систем, таких как ширина стохастизованного слоя и масштабы изменения параметров плазмы (концентрации, температуры) и скорости тороидального вращения. Показано, что в зависимости от отношения коэффициентов классической продольной и аномальной поперечной вязкости, а также отношения коэффициентов стохастической и неоклассической электропроводности плазмы возможно выделить 4 различных режима установления профилей напряженности радиального электрического поля и скорости тороидального вращения плазмы. Полученные автором аналитические выражения использованы для оценки

и сравнения с экспериментальными данными параметров поперечного электрического поля и скорости вращения плазмы в токамаках DIII-D и ТУМАН-3М. Отдельное внимание в главе посвящено изучению эффекта откачки плазмы, проявляющегося при формировании слоя стохастизованного магнитного поля. Предложена модель явления, получено выражение для стохастического потока, обеспечивающего конвективное удаление частиц плазмы из области стохастизованного магнитного поля. Эти результаты проверены автором при помощи численного моделирования в коде B2SOLPS5.2 параметров плазмы в токамаках MAST и ASDEX Upgrade. Для токамака ITER проведена оценка влияния резонансных магнитных возмущений на структуру электрического поля и эффект откачки в установке. Показано, что для ожидаемых в установке параметрах переноса эффект откачки будет мал, в то время как включение резонансных возмущений будет приводить к заметному изменению профиля радиального электрического поля и, как результат, профиля тороидальной скорости вращения плазмы в установке.

Глава 3 диссертации посвящена анализу явления экранирования резонансных магнитных возмущений в плазме токамака с учетом самосогласованного электрического поля. Приведен обзор экспериментальных результатов по наблюдению проникновения резонансных возмущений магнитного поля в плазму. В рамках упрощенной геометрии магнитного поля получены выражения для величины произвольной гармоники возмущенного магнитного поля в стохастизованном слое. Показано, что в зависимости от параметра экранирования, зависящего от самосогласованного электрического поля, и отношения коэффициентов стохастической и неоклассической проводимости плазмы, возможна реализация различных режимов проникновения возмущенного магнитного поля в плазму («ионная» и «электронные» ветви решений, характеризующиеся разными значениями радиального электрического поля и, как результат, разной степенью экранирования возмущения). Для реальной геометрии токамака показано, что величина параметров, определяющих характер экранирования резонансных магнитных возмущений, может существенно изменяться. Получены поправочные коэффициенты, позволяющие учесть влияние геометрии установки на экранирование возмущений. Величина параметра экранирования оценена также и для изолированного магнитного острова, проанализированы различные режимы процесса проникновения возмущения в плазму. Модель экранирования возмущений магнитного поля обобщена также на случай магнитных островов, движущихся в полоидальном направлении. Предсказания модели экранировки сравниваются с результатами численного моделирования (выполненного в том числе и другими исследователями) и экспериментальными данными с токамаков DIII-D, MAST, TEXTOR. Показано, что теоретические результаты диссертации качественно согласуются с

имеющимся экспериментальным материалом. Проведена оценка параметров, определяющих режим экранирования RMP в токамаке ITER. Сделан вывод, что в установке может реализовываться режим экранирования, отвечающий «электронной» ветви решения (положительные значения радиального электрического поля, слабая экранировка магнитных возмущений).

В главе 4 рассмотрен вопрос о влиянии токов, переносимых плазменными филаментами в форме ЭЛМов первого типа, на процесс стохастизации магнитного поля и эффект откачки плазмы в области транспортного барьера в токамаке. Представлен обзор результатов экспериментального наблюдения филаментов существующих токамаках. Проведен анализ механизмов замыкания дипольных и униполярных токов, переносимых плазменным филаментом поперек магнитных поверхностей, оценены их характерные величины. Рассмотрена динамика проникновения магнитного поля тока филамента в плазму и связанного с ним изменения радиального электрического поля, получены выражения для характерных времен этих процессов. Получены оценки влияния магнитного поля филамента на эффект откачки плазмы из области возмущенного магнитного поля. Построена качественная картина удаления частиц и тепла из области транспортного барьера после прохождения через него филамента в форме ELM первого рода.

Глава 5 посвящена анализу физических механизмов, ответственных за радиальные конвективные потоки плазмы на периферии плазменного шнура и формирование ширины скрэп-слоя токамака. Предложена модель переноса плазмы, включающая дрейфовый перенос электронов, приводящая к выражению для ширины скрэп-слоя, близкому к скейлингу, предложенному Голдстоном. Получена оценка для характерного поперечного масштаба изменения концентрации ионов в скрэп-слое токамака. Качественные выводы, следующие из предложенной модели переноса плазмы, сравниваются с результатами численного моделирования параметров пристеночной плазмы токамака ГЛОБУС-М.

В заключении работы представлены основные результаты, полученные в диссертационном исследовании. Приложение к работе содержит сводку формул, используемых в коде B2SOLPS.

Нужно отметить, что полученные в ходе диссертационного исследования научные результаты обладают несомненной научной новизной. Так, впервые получены самосогласованные выражения для напряженности радиального электрического поля и профиля скорости тороидального вращения плазмы токамака, формирующихся при наличии в установке широкого спектра возмущений магнитной конфигурации, создаваемых как внешними источниками, так и образующимися под действием крупномасштабных неустойчивостей плазмы (ЭЛМы первого типа). Предложена модель, которая объясняет

возникновения эффекта откачки плазмы из области стохастизованного магнитного поля, в том числе при развитии ЭЛМов первого рода. Разработана теория проникновения резонансных магнитных возмущений в плазму, объясняющая пороговый характер этого процесса. Наконец, в работе впервые предложена модель конвективного переноса плазмы в скрэп-слое, опирающаяся на детальный анализ потоков частиц на периферии установки и позволяющая получить выражение для ширины скрэп-слоя токамака, уточняющее широко известный скейлинг Голдстона (полученный на основе эвристической модели переноса плазмы на периферии токамака).

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты обладают высокой теоретической и практической ценностью. Они позволят уточнить существующие теоретические модели, описывающие процессы переноса в токамаке, и основанные на них коды для моделирования динамики плазмы. Аналитические выражения для профилей распределения радиального электрического поля, скорости тороидального вращения плазмы, в том числе при наличии в установке резонансных магнитных возмущений или развития ЭЛМов, эффекта откачки плазмы из слоя стохастизованного магнитного поля, оценки ширины скрэп-слоя, будут несомненно полезны для экспериментаторов для интерпретации результатов наблюдений. Наконец, полученные в работе результаты будут крайне полезны для проведения оценок параметров и режимов работы строящегося сейчас токамака ITER.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается корректностью физических постановок исследуемых в работе проблем и применением для их решения строгих аналитических методов. Все полученные в работе результаты сравниваются с имеющимися в литературе экспериментальными данными и данными численных расчетов.

Результаты диссертационного исследования были опубликованы в 33 статьях из списка Web of Science и Scopus и доложены соискателем на 9 международных конференциях.

Сделаем несколько замечаний по результатам, представленным в диссертации:

1. При анализе результатов моделирования параметров разрядов в токамаках MAST, ASDEX Upgrade с учетом эффекта откачки могло бы быть полезным, на наш взгляд, более детально проследить зависимость величины эффекта от параметров плазмы установки и сравнить её с предсказаниями теории. Это позволило бы получить закон подобия для величины уменьшения плотности плазмы внутри стохастизованного слоя магнитного поля, что было бы полезно для экспериментальных исследований.
2. В работе отмечено, что для моделирования параметров плазмы токамака в коде B2SOLPS используются значения аномальных коэффициентов переноса, позволяющие воспроизвести данные экспериментальных наблюдений. Для токамака ITER таких данных пока нет. В связи

с этим возникает вопрос: каким образом в работе выбраны конкретные значения коэффициентов аномального переноса при оценке величины эффекта от качки в ITER?

3. Работа оформлена несколько небрежно. В тексте регулярно встречаются опечатки, местами пропущены знаки препинания, присутствует жаргонные выражения (например, «неоклассические работы», «тороидальное вращение отличается на величину Пфирш-Шлютеровских потоков», «Мирновские зонды», а также ряд других).

Указанные замечания ни в коей мере не умаляют высокой научной ценности и значимости полученных в исследовании результатов.

Диссертация на тему «Механизмы поперечной проводимости в плазме токамака и резонансные магнитные возмущения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным пп. 9-11, 13, 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Кавеева Елизавета Геннадьевна, безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «Физика плазмы» - за разработку самосогласованной теории поперечного переноса заряда, частиц и тепла в токамаке при наличии в плазме установки возмущений магнитного поля различного типа.

Отзыв составил доктор физико-математических наук
специальности 01.04.08 «Физика плазмы», проф.

Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ

Жданов Владимир Михайлович

13.05.2019

Почтовый адрес: кафедра физики плазмы, Институт Л.А.
д. 31, г. Москва, Россия, 115409

Л.А.У МИФИ, Каширское ш.,

Контактный телефон: +7 (495) 788-56-99

Адрес электронной почты: vmzhdanov@mephi.ru, zhdanov@plasma.mephi.ru

Подпись д.ф.-м.н., профессора

Жданова Владимира Михайловича удостоверяю:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Почтовый адрес: Каширское ш., д. 31, г. Москва, Россия, 115409

Контактный телефон: +7 (495) 788-56-99

Адрес электронной почты: info@mephi.ru