

Отзыв на автореферат диссертации
Кавеевой Е.Г.

**«Механизмы поперечной проводимости в плазме токамака и
резонансные магнитные возмущения»**

представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.08 физика плазмы

Диссертация Кавеевой Е.Г. посвящена теоретическому исследованию важной проблемы физики современных токамаков – взаимодействию радиальных электрических полей, токов и резонансных магнитных возмущений. Радиальное электрическое поле играет ключевую роль в формировании периферийного транспортного барьера, благодаря возникновению которого плазма переходит в состояние улучшенного удержания энергии и частиц – Н-моду. Резонансные магнитные возмущения (РМП) могут развиваться в плазме установок с магнитным удержанием самопроизвольно, или создаваться с помощью специальных катушек. Во втором случае РМП применяются с целью стабилизации различных опасных неустойчивостей, например, краевых локализованных мод (ELM), которые развиваются после перехода плазмы в Н-моду и приводят к некоторому ухудшению удержания. Основная опасность ELM обусловлена высокой плотностью выбрасываемого ими на материальные элементы токамака-реактора потока тепла, что может приводить к повреждению элементов конструкции токамака. Успешная реализация подавления ELM с помощью РМП в токамаке-реакторе требует, в частности, разработки теории, описывающей взаимодействие этих явлений и самосогласованно учитывающей генерацию радиального электрического поля и поперечного тока в этом взаимодействии. Для адекватного предсказания плотности потока энергии, выносимого ELM на диверторные пластины реактора, однако, недостаточно иметь информацию о величине выбрасываемой из плазмы энергии, требуется еще знать поперечный размер области в диверторной плазме (т.н. SOL), в котором этот поток энергии имеет место. В настоящий момент имеются скейлинги ширины SOL, построенные на базе данных существующих установок, а также полуэмпирические модели. Экстраполяция их на токамак-реактор ИТЭР не вполне обоснована, и требует как проведения дополнительных экспериментов, так и построения более точных теоретических моделей, учитывающих тонкие физические механизмы распределения потоков тепла и частиц вблизи сепаратрисы и в SOL. Эти соображения обуславливают важность и актуальность темы диссертации, как с точки зрения теории плазмы в токамаке, так и с практической точки зрения реализации УТС в токамаке-реакторе.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Во **Введении** дается обоснование актуальности темы диссертации. **Глава 1** посвящена изложению теории радиального электрического поля и поперечной проводимости плазмы в отсутствие РМП. Показано, что даже при учете аномального переноса частиц, тепла и тороидального момента, радиальное поле остается близким к неоклассическому значению во всей области замкнутых магнитных поверхностей, за исключением узкой области вблизи сепаратрисы. Ширина этой области определяется соотношением между аномальной и неоклассической вязкостью. Проведено сравнение теоретической модели поперечной

проводимости с результатами численного моделирования и экспериментального исследования вольт-амперной характеристики внесенного в плазму электрода на токамаке TEXTOR. Во **второй Главе** в модели поперечной проводимости учтена стохастизация силовых линий магнитного поля при наличии в плазме РМП. Быстрый радиальный уход электронов вдоль стохастизированных силовых линий вносит вклад в формирование радиального электрического поля, поперечной проводимости и профиля скорости тороидального и полоидального вращения плазмы при наличии РМП. Проведено сравнение предсказаний модели с результатами экспериментов на токамаке DIII-D при приложении РМП и на токамаке ТУМАН-3М при развитии в нем «естественной» МГД-активности. Разработана теоретическая модель неоклассического механизма эффекта откачки, т.е. уменьшения плотности плазмы в области пьедестала при включении РМП, предсказания которой находятся в согласии с наблюдениями на токамаке MAST. Модель применена для анализа воздействия РМП на градиент давления в токамаке-реакторе ИТЭР. Показано, что, несмотря на отсутствие эффекта откачки в данном случае, можно ожидать уменьшения градиента давления, а значит, и подавления ELM – благодаря уменьшению градиента электронной температуры вследствие увеличения электронной теплопроводности. Важным процессом, влияющим на проникновение РМП в плазму, является генерация токов – как электронного, протекающего вдоль стохастизированных силовых линий поля, так и радиального неоклассического ионного. Самосогласованный учет этих токов и радиального электрического поля проведен в **Главе 3**, в результате чего автору удалось создать модель, адекватно описывающую наблюдаемые в эксперименте эффекты, в частности – пороговый характер проникновения РМП в плазму токамака.

Глава 4 посвящена теоретическому исследованию эффектов, возникающих в пристеночной плазме токамака при стохастизации магнитного поля под воздействием филаментов, сопровождающих ELM первого рода. Выделены дипольные и линейные токи, протекающие в филаментах, проанализировано их влияние на проникновение в область периферийного транспортного барьера возмущения магнитного поля, вызванного филаментами. Предложен сценарий динамического эффекта откачки, позволяющий адекватно описать выброс вещества из области транспортного барьера при ELM первого рода в токамаке MAST. **Глава 5** посвящена расчету конвективных потоков снаружи от сепараторы, в области SOL. Понимание механизма формирования толщины SOL критически важно для работы токамака-реактора, поскольку этот параметр, в совокупности с полным потоком энергии из основной плазмы в SOL, определяет плотность потока энергии на диверторные пластины и, следовательно, безаварийное функционирование дивертора и токамака-реактора. Сделана оценка для ширины SOL, проведено моделирование пристеночной плазмы для токамака Глобус-М, проанализирован вклад различных слагаемых в потоки тепла в электронной компоненте и в радиальный перенос ионов. В **Заключении** сформулированы результаты и выводы диссертации.

В целом, следует отметить, что данная диссертационная работа выполнена на высоком научном и методическом уровне. Развитые в ней теоретические подходы оказались плодотворными как с точки зрения развития теории термоядерной тороидальной плазмы, так и в практическом отношении. Особенно следует отметить то обстоятельство, что результаты аналитических и численных моделей сравниваются автором работы с результатами экспериментов на многих токамаках, как зарубежных (DIII-D, MAST, ASDEX), так и российских (Глобус-М), а также с предсказаниями

эмпирических законов подобия – скейлингов, построенных на базе данных многих экспериментов. В результате этого сравнения обнаруживается хорошее согласие теории с экспериментом. Это вселяет обоснованную надежду на то, что результаты данной теоретической работы можно экстраполировать и на масштаб и параметры сооружаемого первого экспериментального токамака-реактора ИТЭР.

Все полученные автором результаты являются новыми, опубликованы в рецензируемых научных журналах и неоднократно докладывались на международных конференциях.

Положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации являются хорошо обоснованными.

В целом, автореферат хорошо структурирован, полно отражает содержание диссертации и написан хорошим русским языком.

Автореферат свидетельствует о том, что диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней к докторским диссертациям, а автор работы Кавеева Е.Г заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

С.н.с. лаб. физики высокотемпературной плазмы

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

д. ф.-м. н.

...../Аскинази Л.Г. /