

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт общей
физики А.М. Прохорова Российской
академии наук
УК

В.В. Глушков

мая 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Кавеевой Елизаветы Геннадьевны
«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.

Диссертационная работа Елизаветы Геннадьевны Кавеевой посвящена моделированию
структуры электрического поля и механизмов переноса в высокотемпературной плазме
различных замкнутых магнитных ловушек (токамаков).

Целью диссертационной работы является развитие теоретических моделей электрического
поля, тороидального вращения и радиального переноса плазмы при стохастизации
магнитного поля в режимах с резонансными магнитными возмущениями (RMP) для
различных токамаков.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, приложения и списка литературы,
содержащего 115 ссылок. Диссертация содержит 175 страниц текста, включающего 47
рисунков и 1 таблицу.

Структура диссертации

Во введении описаны основные экспериментальные наблюдения, дана постановка
задачи.

В первой главе изложена модель радиальной проводимости в токамаке в тороидально симметричном случае. Модель базируется на совместном учете аномальной вязкости, описывающей перенос тороидального и продольного импульса турбулентными потоками, и классической вязкости, определяющей вязкую силу за счет изменения продольной по отношению к магнитному полю скорости вдоль направления магнитного поля. Модель частично воспроизводит и существенно дополняет результаты, полученные ранее в работе В.А. Рожанского и М.Б. Тендлера. Согласно модели, поперек магнитных поверхностей в токамаке может течь электрический ток, если электрическое поле отклоняется от неоклассической величины. При этом возникает проекция силы Ампера на тороидальное направление, меняющая тороидальную скорость и компенсируемая турбулентным переносом тороидального импульса. Показано, что существуют два режима проводимости, в одном из которых отклонение электрического поля от неоклассического существенное, а проводимость определяется классической вязкостью. В другом режиме существенным оказывается тороидальное раскручивание плазмы, и проводимость определяется аномальной поперечной вязкостью. В установке реализуется тот режим, который дает наименьшую проводимость из двух, в зависимости от параметров. Показано, что радиальный ток обеспечивается ионами. Модель подтверждается экспериментами, в которых поперечная проводимость измерялась электродом, помещенным в плазму, и с помощью численного моделирования. Таким образом дается обоснование понятия радиальной ионной проводимости, используемого в следующих главах.

В главе два модель применена к случаю, когда в плазме токамака внешними катушками создается радиальное тороидально не симметричное возмущение магнитного поля, приводящее к формированию магнитных островов вблизи сепаратрисы и, для достаточно больших островов, к случайному блужданию силовых линий магнитного поля между островами. При формировании такой структуры возможен уход электронов вдоль силовых линий магнитного поля из плазмы. Электрическое поле, которое могло бы удерживать электроны, должно быть направлено из плазмы. В работе результирующее электрическое поле определяется из условия квазинейтральности, требующего одновременного ухода из плазмы как электронов, так и ионов. Согласно предложенной модели, ионы уходят благодаря радиальной ионной проводимости, а электроны - вдоль силовых линий магнитного поля. При этом происходит изменение тороидального вращения плазмы за счет силы Ампера. Конвективный перенос ионов связан с их током. Показано, что этот конвективный перенос объясняет наблюдаемое в эксперименте понижение градиента концентрации в плазме и связанное с ним понижение градиента давления. Проведен качественный анализ экспериментов на токамаке DIII-D и ТУМАН-3М, позволяющий объяснить наблюдаемые на

этих установках явления при включении RMP. На основании модели даны выводы для ИТЭР. Согласно модели, электрическое поле в ИТЭР будет при увеличении RMP быстро меняться к положительному значению, с одновременным существенным увеличением тороидального вращения плазмы. Уменьшение концентрации плазмы в ИТЭР, характерное для современных установок при включении RMP, наблюдаться не будет, в то же время будет падать электронная температура, позволяя перевести плазму в стабильный режим без неустойчивостей типа ELM.

В **третьей главе** описывается влияние на возмущение магнитного поля продольных токов, связанных с уходом из плазмы электронов. Показано, что эти токи должны рассчитываться с учетом радиальной ионной проводимости, поскольку уход электронов из плазмы возможен только совместно с ионами. При этом уровень RMP с учетом экранирования определяет радиальное электрическое поле, а радиальное электрическое поле определяет экранирующие токи. Согласованная модель показывает, что переход от режима с экранированием RMP к режиму без экранирования происходит при увеличении тока в создающих RMP катушках, в небольшом интервале токов. Модель была успешно использована для объяснения наблюдаемого в современных токамаках порога экранирования RMP, зависимости экранирования от тороидального вращения RMP и плазмы и от концентрации плазмы. Сделаны предсказания для ИТЭР. В ИТЭР граница перехода от экранирования к проникновению в плазму RMP будет резче, чем в современных токамаках, и возможно одновременное существование режимов как с экранированием магнитных возмущений, так и без экранирования, для одного и того же тока во внешних катушках.

В **четвертой главе** рассматривается приложение модели к конвективному переносу вещества при развитии ELM. Неустойчивость типа ELM сопровождается развитием несущих ток филаментов. В диссертации показано, что токи в филаментах могут приводить к возникновению магнитных островов, так же, как и внешние токи, и к аналогичным конвективным потокам, связанным с ионной проводимостью и с уходом электронов вдоль модифицированного магнитного поля. Этот эффект должен рассматриваться динамически в силу малого времени жизни филаментов. В работе показано, что такой механизм объясняет всю потерю вещества из плазмы при развитии ELM, не связанную с отрывом от плазмы филаментов для эксперимента на токамаке MAST, где были проведены соответствующие измерения.

В **пятой главе** рассматривается конвективный перенос плазмы снаружи сепаратрисы. В этой области силовые линии выходят на пластины дивертора и поэтому электрическое поле не неоклассическое, а определяется продольным балансом сил для электронов и слоем пространственного заряда на пластинах. Согласно модели, этим объясняется возникновение

конвективного потока ионов, связанного с током и описываемого радиальной проводимостью. Этот ток замыкается через пластины дивертора, а конвективный поток дает вклад в формирование слоя пристеночной плазмы снаружи сепаратрисы. Такой поток продемонстрирован в работе на примере моделирования для токамака ГЛОБУС-М.

В **заключении** подведены итоги и даны основные выводы из диссертационной работы.

Актуальность работы

Работа Кавеевой Е.Г. посвящена кругу физических явлений в плазме токамака, в описании которых играет существенную роль явление поперечной проводимости. Эти явления включают в себя конвективный перенос плазмы в присутствии внешних резонансных возмущений магнитного поля (RMP) и перенос плазмы снаружи сепаратрисы.

Экспериментально показано, что RMP позволяют добиться стабильного стационарного режима работы токамака с улучшенным удержанием плазмы без неустойчивостей типа ELM. Использование RMP планируется в токамаке-реакторе ИТЭР. Поэтому задача описания удержания плазмы при включении RMP в токамаке является весьма актуальной. Конвективные потоки снаружи сепаратрисы влияют на удержание плазмы в пристеночной области и сказываются на всей работе современных установок типа токамак. В силу этого тема работы обладает большой актуальностью.

Научная новизна и практическая значимость

В работе впервые самосогласованно проанализирован отклик плазмы на резонансные магнитные возмущения в присутствии реалистичных значений ионной радиальной проводимости. Впервые получены выражения для самосогласованного электрического поля и тороидального вращения плазмы при введении в магнитную систему малых возмущений поля на гармониках, соответствующих рациональным магнитным поверхностям в области вблизи сепаратрисы установки и образовании магнитных островов. Впервые получены параметры экранирования магнитного поля плазмой с учетом продольных токов электронов, вызванных возмущением магнитного поля и компенсирующих их ионных токов, связанных с радиальной проводимостью. Впервые получены выражения для конвективного потока из плазмы, связанного с отклонением электрического поля от неоклассической величины при включении RMP. Впервые получены оценки для конвективного переноса в присутствии возмущения магнитного поля в области внутри сепаратрисы при развитии неустойчивостей типа ELM. Впервые получены выражения для конвективного переноса, связанного с ионным

радиальным током снаружи сепаратрисы, при отклонении электрического поля от неоклассического в этой области.

Практическая значимость работы обусловлена применимостью полученных формул для предсказания экспериментов на современных токамаках и выбора их рабочих параметров в режимах с включенными резонансными магнитными возмущениями. Модель позволяет сделать выводы о режиме работы будущих установок, таких как токамак-реактор ИТЭР.

Практическая значимость модели конвективного переноса снаружи сепаратрисы обусловлена важностью этой области для распределения приходящих из плазмы потоков энергии на пластины дивертора. Эти пластины испытывают предельные тепловые нагрузки, и их нормальное функционирование зависит от ширины слоя пристеночной плазмы, в которой переносится основной поток энергии. В свою очередь, ширина этой области определяется процессами радиального переноса, частью которых являются конвективные потоки.

Достоверность выводов и научных положений

Результаты, полученные в диссертации, подтверждаются многочисленными экспериментальными наблюдениями:

- изменение электрического поля при включении RMP - измерениями на токамаках MAST, DIII-D, ТУМАН-3М, ASDEX-Upgrade;
- конвективный перенос в области транспортного барьера при RMP - измерениями в токамаках DIII-D и MAST;
- экранирование резонансных магнитных возмущений - измерениями на токамаках DIII-D и TEXTOR;
- конвективный перенос при развитии ELM - измерениями на токамаке MAST.

В поддержку предложенной аналитической модели было проведено численное моделирование кодом B2SOLPS5.2 и его более поздней версией SOLPS-ITER, подтверждающее правильность изложенного в модели подхода для описания согласованного изменения тороидального вращения плазмы, электрического поля и радиальных конвективных потоков.

Модель экранирования резонансных магнитных возмущений плазмой подтверждается результатами моделирования трехмерной магнитной конфигурации с помощью кода RMHD

Оценка для конвективных потоков снаружи сепаратрисы подтверждается результатами моделирования кодом SOLPS-ITER в широком диапазоне параметров токамаков.

Несмотря на общее положительное заключение о диссертации, уместно сделать несколько **замечаний**.

1. Следует более осторожно использовать ряд терминов, нежели это делается в диссертации. В частности, к ним относится термин стохастический. В современной физике это сленговое выражение, определяющее широкий класс явлений. Если уж использовать этот термин, то необходимо подробно пояснять, что же имеется в виду в каждом конкретном случае.

2. Следует более подробно обсудить, насколько хорошо классическое (неоклассическое) приближение подходит для вычисления величины электрического поля. Для проникновения продольного тока в токамаке задача решается, поскольку проникновение тока в центр плазменного шнура надежно фиксируется по пилообразным колебаниям. Физика процесса фиксируется при помощи измерения плазменных профилей и моделирования. А как быть с самосогласованным поперечным полем?

3. Следует более аргументированно обсудить практическую применимость использования метода так называемых филаментов при анализе мод, локализованных на краю плазменного шнура (ELMs). Как показывает практика, с развитием вычислительной техники и математических методов, простые методы уходят из практики.

4. В настоящее время весьма часто появляются модели и численные процедуры для описания пучков силовых линий, опирающихся на диверторные пластины. Часто проверить их при помощи эксперимента невозможно. А вот сравнить с физической точки зрения стоит.

Сделанные замечания не затрагивают основных положений диссертационной работы. Результаты работы оригинальны и важны для развития описания плазмы в установках типа токамак, и могут использоваться для анализа и планирования эксперимента на отечественных и зарубежных установках. Основные задачи работы и ее результаты соответствуют паспорту специальности 01.04.08 - физика плазмы. Результаты работы полностью отражены в 33 публикациях в высокорейтинговых журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат включает все разделы диссертации и полностью отражает ее содержание. Результаты диссертации прошли апробацию на многих международных конференциях.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой. По уровню новизны, актуальности и значимости результатов диссертация Кавеевой Елизаветы Геннадьевны соответствует требованиям п. 9 – 11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. № 1168) для научно-квалификационных работ. Автор

диссертации - Кавеева Е.Г. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы.

Отзыв ведущей организации составлен главным научным сотрудником ИОФ РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 «Физика плазмы» Батановым Г.М., тел. 8-(499)-503-87-77 (доб. 5-44); email: batanov@fpl.gpi.ru на основе обсуждения содержания диссертации на семинаре ОФП ИОФ РАН, который состоялся 25.04.2019. Результаты работы на семинаре были оценены положительно.

Отзыв утвержден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 454 от 29.04.2019.

Главный научный сотрудник
отдела физики плазмы ИОФ РАН,
доктор физико-математических наук

Батанов Г.М.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН)

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

тел.: +7 499 503 8734

e-mail: office@gpi.ru

<http://www.gpi.ru/>