

ОТЗЫВ

официального оппонента Кутеева Бориса Васильевича,
доктора физико-математических наук, профессора, заместителя руководителя
отделения токамаков ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт»,
почтовый адрес 123182 Москва, Площадь академика Курчатова дом. 1,
телефон +7 499 1967001, электронная почта Kuteev_BV@nrcki.ru,

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.

1. Актуальность избранной темы.

Диссертационная работа Кавеевой Е.Г. посвящена теоретическим и расчетным исследованиям физических процессов в пристеночной плазме термоядерных установок типа токамак, являющихся признанным лидером среди систем с магнитным удержанием плазмы. Основное внимание в работе уделено эффектам, обусловленным механизмами поперечной проводимости, воздействием на плазму резонансных магнитных возмущений, а также самоорганизацией плазмы. Ключевым фактором влияния на транспортные процессы в плазме токамаков является радиальное электрическое поле, генерируемое электронной и ионной компонентами за счет комбинации столкновительного и турбулентного переносов, которые испытывают влияние замкнутой магнитной конфигурации токамака.

Высокая актуальность выполненных исследований для реализации глобальной термоядерной программы связана с необходимостью оптимизации параметров и методов управления плазмой в области наиболее интенсивного теплообмена плазмы токамаков с первой стенкой и дивертором. Для термоядерного реактора данная проблема входит в число наиболее важных инженерно-физических задач, наряду с задачей формирования центральной плазмы с высокими характеристиками устойчивости и удержания энергии.

В диссертации рассмотрен комплекс фундаментальных и прикладных задач, для которых важны модификация электрического поля по сравнению с неоклассическим значением и учет влияния на решение турбулентного переноса частиц и импульса. Разработаны аналитические модели, в которых приводятся результаты двумерных численных расчетов, подтверждающие соответствующие эксперименты. Диссертационная

работа существенно развивает современные знания о пристеночной плазме токамака и методы предсказания ее характеристик.

Поэтому описанные в диссертационной работе исследования представляют несомненный интерес для активного физического обоснования и широкого практического внедрения разработанных методов моделирования пристеночной плазмы в практике анализа и планирования экспериментов на действующих и будущих токамаках. Предложенные автором новые подходы к анализу процессов в пристеночной плазме токамаков представляются весьма актуальными и способными внести заметный вклад в обоснование выбора параметров будущих термоядерных установок на основе оригинальных расчетно-теоретических методов и глубокого понимания физических процессов, определяющих характеристики пристеночной плазмы.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научные положения, выводы и рекомендации обоснованы в диссертации адекватным теоретическим анализом процессов в объектах исследования, сравнением с оригинальными экспериментами на действующих российских и зарубежных установках токамак, детальным анализом воздействия на процессы внешних факторов. Положения, выводы и рекомендации сформулированы достаточно лаконично и не вызывают сомнений в их обоснованности.

3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В диссертации получены следующие новые результаты:

- 1) разработана оригинальная модель формирования электрического поля в зоне пьедестала вблизи сепаратрисы в условиях стохастизации магнитного поля, обусловленного резонансными магнитными возмущениями(RMP), которая была подтверждена экспериментами на установках DIII-D, ASDEX-Upgrade, MAST, Туман-3М и позволившая описать эволюцию электрического поля при включении RMP;
- 2) предложена модель конвективного механизма переноса плотности и энергии при воздействии RMP на зону пьедестала, объяснившая наблюдавшийся на токамаках DIII-D, ASDEX-Upgrade, MAST сброс плотности и модификацию профиля электронной температуры;

- 3) предложена модель, описывающая динамику проникновения возмущений магнитного поля RMP в пристеночную плазму, учитывающая генерацию тока электронов вдоль силовых линий стохастизированного магнитного поля одновременно с радиальным конвективным переносом ионов;
- 4) предложен новый механизм переноса частиц и тепла в пьедестале, который базируется на процессе стохастизации магнитного поля в области транспортного барьера при возбуждении периферийных мод (ELM) первого рода;
- 5) впервые детально теоретически проанализированы конвективные механизмы радиального переноса плазмы снаружи от сепаратрисы, обусловленные отклонениями от неоклассического электрического поля;
- 6) впервые проведено моделирование электрического поля в токамаке-реакторе ИТЭР (Международный Термоядерный Экспериментальный Реактор) при RMP, показавшее, что направление электрического поля в токамаке ИТЭР изменится на противоположное по сравнению с наблюдаемым в современных токамаках.
- 7) предложенные теоретические модели существенно развили аналитические и численные подходы, развиваемые в работах М.З.Токаря, М. Бекалье, Р. Дж. Голдстона.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Научная ценность проведенных в диссертации исследований определяется важностью разработанных моделей для анализа и интерпретации современных экспериментов на установках типа токамак. Полученные в диссертации результаты позволяют объяснить ряд физических эффектов, обнаруженных в результате недавних экспериментальных наблюдений на токамаках:

- тороидальное раскручивание плазмы при включении резонансных магнитных возмущений в токамаках MAST и DIII-D;
- изменение радиального электрического поля в области пьедестала на токамаках TEXTOR, DIII-D, MAST, ASDEX-Upgrade при воздействии RMP;
- экранирование RMP плазмой и пороговый характер проникновения в плазму токамаков возмущений магнитного поля, обусловленные наведенными электрическими токами в области пьедестала;
- потерю частиц плазмой при развитии ELM первого рода в транспортном барьере, превышающую перенос вещества в отсутствие стохастизации;

- высокочастотную активность, наблюдаемую с помощью магнитных зондов на периферии плазмы в токамаке MAST, при развитии ELM.

Практическая ценность работы подтверждается тем, что:

- резонансные магнитные возмущения планируется применять на ИТЭР для управления транспортным барьером и подавления ELM первого рода. Полученные результаты позволяют сделать предсказания о характеристиках электрического поля и тороидального вращения при включении RMP и значениях пороговой величины магнитного поля, необходимых для проникновения возмущений в плазму;
- электрическое поле в пьедестале является фактором, определяющим существование транспортного барьера и режима улучшенного удержания;
- развитые модели позволяют сделать прогнозы воздействия резонансного магнитного поля на поведение транспортного барьера в токамаках;
- подавление ELM достигается за счет эффекта откачки благодаря понижению градиента давления в транспортном барьере ниже границы устойчивости;
- предложенная модель эффекта откачки позволяет сделать предсказания для условий работы ИТЭР.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты диссертации могут быть использованы для совершенствования аналитических и численных моделей пристеночной плазмы токамака, анализа экспериментальных результатов, полученных на действующих установках и прогнозирования параметров будущих.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности.

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, которая решила задачу, важную для понимания процессов формирования электрического поля в области пьедестала в условиях воздействия резонансных магнитных полей.

5. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Очевидными достоинствами содержания диссертации являются:

- применение при создании теоретических и расчетных моделей базовых физических принципов;
- активное использование при выполнении работы международного сотрудничества, что обеспечило получение результатов мирового уровня;
- тесная связь с экспериментальной программой токамаков;
- успешная международная экспертиза полученных результатов;
- ясное изложение научных идей и полученных результатов.

В целом, диссертация оформлена достаточно хорошо. Имеются мелкие недостатки. Использование части рисунков в двуязычных вариантах можно было бы исключить. Нумерация литературы могла бы быть оптимизирована.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. В главе 1 при анализе токов в плазме только в конце становится ясным, что речь идет об ионном радиальном токе, который полностью компенсируется радиальной компонентой электронного тока.
2. Пороговый характер воздействия возмущений RMP на рост островов вследствие тиринг-мод, скорее связан с необходимостью создания затравочного размера островов, а не характеристиками резонансных возмущений.
3. Утверждение в выводах Главы 2 «Модель предсказывает для современных токамаков подъем температуры плазмы при эффекте откачки за счет уменьшения турбулентной теплопроводности при уменьшении концентрации» вызывает удивление, поскольку турбулентность ответственна за сброс как температуры, так и плотности.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертации.

6. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация Кавеевой Е.Г. выполнена на высоком научном уровне, представляет как научный, так и практический интерес. Автор продемонстрировала хорошее владение теоретическими и расчетными методами физики плазмы, а также методами анализа экспериментов на токамаках. Материал диссертации изложен достаточно ясно и лаконично, проиллюстрирован многочисленными рисунками. Основные результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных изданиях, включая публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

В диссертации решена крупная научная задача - построена физическая модель механизмов протекания радиального тока в токамаке при наложении резонансных магнитных возмущений.

Таким образом, диссертация Кавеевой Е.Г. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08-физика плазмы, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент

Доктор физ.-мат. наук, профессор
Зам. руководителя отделения токамаков
ККТЭ и ПТ

ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

Телефон: +79165530566 ; E-mail: Kuteev_BV@nrcki.ru

НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, 123182

Кутеев Борис Васильевич

Подпись д.ф.-м.н., профессора Б.В. Кутеева заверяю,

Главный ученый секретарь

ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

Доктор физ.-мат. наук

Форш П.А.