на правах рукописи

КАВЕЕВА Елизавета Геннадьевна

# МЕХАНИЗМЫ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА И РЕЗОНАНСНЫЕ МАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

01.04.08 Физика плазмы

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

> Санкт-Петербург 2019

Работа выполнена в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого

## Научный консультант:

Рожанский Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики плазмы в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого

## Официальные оппоненты:

Кутеев Борис Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель руководителя отделения НИЦ "Курчатовский институт" Жданов Владимир Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика плазмы» Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Голубовский Юрий Борисович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики, Санкт-Петербургский государственный университет

## Ведущая организация: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится "6" июня 2019 г. в " 14-00"

на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 Физико-Технического института им. А. Ф. Иоффе по адресу : 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.26. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФТИ им. А. Ф. Иоффе http://www.ioffe.ru

Автореферат разослан "30" апреля 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, Красильщиков Александр Михайлович к.ф.-м.н.

#### Общая характеристика работы

#### Актуальность темы и степень ее разработанности

Режим улучшенного удержания плазмы (Н-режим) является важнейшим режимом работы термоядерного реактора типа токамак. В этом режиме существенно повышается плотность и температура плазмы вблизи последней замкнутой магнитной поверхности – сепаратрисы, позволяя установке приблизиться к термоядерным параметрам. Планируется, что ИТЭР (Интернациональный Термоядерный Экспериментальный Реактор) будет работать в Н-режиме. Как теоретические представления [1], так и эксперимент [2], указывают, что переход в Н-режим определяется неоднородным электрическим полем вблизи сепаратрисы токамака. Еще в ранних неоклассических работах [3] было вычислено так называемое неоклассическое радиальное электрическое поле. Как показали последующие исследования [см. обзор 4 и др.], в том числе и моделирования, проведенные ранее с участием автора, даже в присутствии турбулентных потоков электрическое поле остается в большей части установки неоклассическим. Исключение составляет узкая переходная область у самой сепаратрисы, ширина которой (менее сантиметра) определяется турбулентным переносом импульса, а величина отклонения поля от неоклассического значения структурой потоков в SOL (Scrape off layer, область снаружи сепаратрисы, где плазма стекает на пластины дивертора). Аналогичная структура электрического поля около магнитного острова, формирующаяся вблизи рациональной магнитной поверхности в центральной плазме может приводить к формированию внутреннего транспортного барьера. Такая структура была рассмотрена в кандидатской диссертации автора.

Неоклассический характер радиального электрического поля в режиме улучшенного удержания в настоящее время подтвержден большим количеством экспериментов на различных токамаках [5, 6, 7, 8].

Существенной проблемой при использовании режимов с транспортным барьером являются периодически возникающие на фоне высоких градиентов концентрации и температур в транспортном барьере крупномасштабные неустойчивости ELM (Edge Localized Modes). При развитии ELM энергия из области транспортного барьера за малое время порядка нескольких десятков или сотен микросекунд [9] переносится за сепаратрису, при особо крупных ELM первого рода это может быть до нескольких процентов энергии, запасенной в плазме [10]. Такие выбросы энергии создают периодическую большую тепловую нагрузку на пластины дивертора, которая, согласно экстраполяциям (скейлингам) в условиях ИТЭР окажется неприемлемой для его функционирования [11].

Экспериментально обнаружено, что понизить градиент давления в транспортном барьере ниже критического уровня, приводящего к ELM первого рода, можно с помощью внесения в магнитное поле, удерживающее плазму, тороидально несимметричных возмущений RMP (resonance magnetic perturbations) [12, 13, 14, 15]. Эти возмущения должны включать широкий спектр гармоник, соответствующих рациональным магнитным поверхностям вблизи сепаратрисы. Относительная величина возмущений составляет порядка 10<sup>-4</sup>, однако даже таких маленьких отклонений магнитного поля от тороидальной симметрии достаточно, чтобы создать вблизи сепаратрисы область с перекрывающимися магнитными островами. Происходит стохастизация - «перемешивание» силовых линий магнитного поля. Из эксперимента известно, что при этом меняется не только градиент

давления, но и электрическое поле в транспортном барьере и скорость тороидального вращения плазмы [6, 16, 17, 18]. До настоящего времени согласованной модели этого явления не было, несмотря на то, что в ИТЭР планируется использование RMP для подавления ELM.

Из эксперимента известно, что проникновение в плазму внешних магнитных возмущений носит пороговый характер [15, 19, 20, 21, 22]. Возмущения малой амплитуды экранируются плазмой, в то время как выше пороговой величины возмущающего магнитного поля происходит быстрое формирование стохастического слоя и соответствующая этому перестройка пристеночной плазмы. Также известно, что проникновение резонансных возмущений в плазму низкой плотности происходит легче [6, 12, 13, 14]. Согласованной модели данного явления, учитывающей модификацию неоклассического поля резонансными магнитными возмущениями, до сих пор предложено не было.

Существовали экспериментальные указания, что, помимо прямого переноса вещества возникающими при развитии ELM первого рода филаментами (вытянутыми вдоль магнитного поля узкими плазменными структурами), существует другой механизм потери частиц плазмы. Такой механизм может быть найден вместе с механизмом переноса плазмы при включении RMP. Существуют экспериментальные указания на то, что при развитии ELM происходит временная стохастизация магнитного поля в транспортном барьере. В частности, наблюдалось изменение направления радиального электрического поля, как это наблюдается при развитом RMP.

Для описания процессов в плазме токамака при включении RMP был разработан целый ряд аналитических [23, 24] и численных моделей [20, 25,

26] и МГД кодов, таких как модификации кода M3D [27], MARS [28] и JOREK[29]. Все эти модели указывают на существенное взаимное влияние вращения плазмы и ее отклика на резонансные магнитные возмущения. Однако все они не являются самосогласованными и содержат по крайней мере один свободный параметр, который связан с неизвестным самосогласованным электрическим полем. В отсутствие модели для радиального электрического поля ценность таких кодов весьма ограничена.

Отдельно стоит задача переноса плазмы снаружи сепаратрисы, в SOL. Радиальный перенос плазмы в SOL определяет ширину SOL, а следовательно, плотность потока энергии на пластины дивертора. Технически обоснованная предельная плотность потока энергии для ИТЭР составляет около 10 MBт/м<sup>2</sup>, и это значение оказывается трудно достижимым. Современные экспериментальные скейлинги [30] дают для ИТЭР ширину SOL на внешнем обводе порядка одного миллиметра, при которой электронный поток тепла поступает в область дивертора шириной в единицы см. Широко известно объяснение экспериментальных скейлингов моделью Голдстона [31]. Эта модель описывает перенос ионов через сепаратрису и в области SOL с помощью градиентного дрейфа и перенос энергии электронов с помощью турбулентности в область, заполненную ионами за счет их дрейфа. Такая модель неявно предполагает, что существует значительный поток ионов через сепаратрису, а затем ионы стекают в дивертор с околозвуковой скоростью. Однако моделирование в геометрии токамака ИТЭР, в том числе, проведенное автором, показывает, что поток нейтральных атомов внутрь сепаратрисы незначителен, практически вся ионизация сосредоточена в зоне дивертора. Потоки ионов в SOL выше X-точки носят Пфирш-Шлютеровский характер, то есть радиальные дрейфовые потоки

замыкаются большей частью через SOL, а не стекают полностью в дивертор. Отсюда видно, что картина потоков и токов в SOL сложнее модели Голдстона и должна быть разобрана более подробно для понимания вклада дрейфов и радиальных токов в перенос в SOL. Кроме того, не было попыток учесть вклад дрейфовой составляющей в радиальный перенос тепла электронов.

Поэтому тема диссертации имеет высокую актуальность.

#### Цели и задачи диссертационной работы

1. Развитие теоретической модели электрического поля и тороидального вращения плазмы токамака при стохастизации магнитного поля в режимах с резонансными магнитными возмущениями(RMP).

2. Моделирование радиальных электрических полей при протекании радиального тока в токамаке.

3. Развитие теоретической модели дополнительного радиального переноса плазмы (эффекта откачки) при RMP.

4. Моделирование эффекта откачки, электрического поля и тороидального вращения плазмы токамака при стохастизации магнитного поля в режимах с резонансными магнитными возмущениями для токамаков MAST и ИТЭР.

5. Теоретическое описание экранирования плазмой внешнего магнитного поля при RMP, согласованного с изменением электрического поля.

6. Описание эффекта откачки при стохастизации магнитного поля вблизи сепаратрисы токамака токами в филаментах при ELM первого рода.

7. Теоретический анализ и моделирование дрейфовых механизмов радиального переноса плазмы снаружи от сепаратрисы.

#### Основные положения, выносимые на защиту

1) Модель эволюции радиального электрического поля при стохастизации магнитного поля в плазме токамака внешними резонансными магнитными возмущениями(RMP), учитывающая неоклассические механизмы проводимости поперек магнитного поля, перенос электронов вдоль магнитного поля и турбулентный перенос тороидального импульса.

2) Механизм конвективного эффекта откачки плазмы токамака при RMP, учитывающий перенос электронов вдоль стохастизированных линий магнитного поля, и конвективный перенос ионов поперек магнитного поля.

3) Модель экранирования плазмой токамака внешнего возмущения магнитного поля токами, связанными с движением электронов вдоль силовых линий при одновременном уходе ионов поперек магнитного поля за счет конвективных механизмов.

4) Модель переноса частиц в плазме токамака при крупномасштабных неустойчивостях (ELM) первого рода, благодаря временной стохастизации магнитного поля вблизи сепаратрисы.

5) Механизм конвективного радиального переноса плазмы токамака снаружи от сепаратрисы.

#### Научная новизна работы состоит в следующем

1) Впервые предложена модель электрического поля при стохастизации магнитного поля в плазме токамака при включении резонансных магнитных возмущений(RMP).

2) Впервые предложена модель конвективного механизма откачки (уменьшения концентрации) при RMP.

3) Впервые проанализирована модель экранирования плазмой возмущений магнитного поля токами, связанными с движением электронов вдоль силовых линий стохастического магнитного поля при одновременном уходе ионов за счет конвективного радиального переноса.

4) Впервые предложен механизм ухода частиц и тепла из плазмы при ELM первого рода, связанный с временной стохастизацией магнитного поля в области транспортного барьера.

5) Впервые проведен детальный теоретический анализ конвективных механизмов радиального переноса плазмы снаружи от сепаратрисы.

6) Впервые проведено моделирование электрического поля в токамакереакторе ИТЭР при RMP.

Научная и практическая значимость исследований, проведенных в диссертации определяется важностью модели для современных экспериментов на установках типа токамак. Полученные в диссертации результаты позволяют объяснить ряд экспериментальных наблюдений на токамаках:

- тороидальное раскручивание плазмы при включении резонансных магнитных возмущений в токамаках MAST и DIII-D

- эффект откачки при включении резонансных магнитных возмущений (RMP) в токамаках ASDEX-Upgrade, MAST, DIII-D

- изменение электрического поля при RMP в токамаках TEXTOR, DIII-D, MAST, ASDEX-Upgrade

 экранирование RMP плазмой токамака и пороговый характер проникновения возмущений магнитного поля в плазму токамаков

- полоидальный сдвиг частично заэкранированных плазмой магнитных островов, наблюдавшийся в токамаке TEXTOR

- потерю частиц плазмой при развитии крупномасштабных неустойчивостей в транспортном барьере (ELM) первого рода, превышающую перенос вещества филаментами, наблюдаемую в токамаке MAST

- высокочастотную активность, наблюдаемую при прохождении филаментом магнитного зонда на периферии плазмы в токамаке MAST

- применимость скейлинга Эйха для описания ширины SOL (область снаружи сепаратрисы) в режимах, в которых потоком ионов через сепаратрису можно пренебречь на фоне ионизации и рециклинга в диверторе.

Резонансные магнитные возмущения планируется применять на ИТЭР (Интернациональный Термоядерный Экспериментальный Реактор) для управления транспортным барьером и подавления ELM первого рода. Полученные результаты позволяют сделать предсказания о характере электрического поля и тороидального вращения при включении RMP и пороговой величине возмущений магнитного поля, необходимой для их проникновения в плазму. Поскольку электрическое поле является фактором, определяющим существование транспортного барьера и режима улучшенного удержания, можно сделать вывод о том, как повлияет резонансное магнитное поле на поведение транспортного барьера. Подавление ELM достигается благодаря понижению градиента давления в транспортном барьере ниже порогового для неустойчивости значения при эффекте откачки. Предложенная модель эффекта откачки позволяет сделать предсказания этого эффекта для ИТЭР.

## Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием адекватного математического аппарата, сравнением с экспериментальными данными, а также результатами моделирования, проведенного автором с помощью кодов B2SOLPPS и SOLPS-ITER, и проведенного исследовательской группой ИТЭР с помощью моделирования кодом RMHD. Результаты работы неоднократно были доложены на международных научных конференциях:

 Конференции Европейского Физического Общества (EPS) по физике плазмы в 2002, 2008, 2010, 2015 годах – стендовые доклады.

 Конференция «Finnish – Russian Seminar on High Temperature Plasma Physics» в 2008 году – устный доклад.

Конференция МАГАТЭ «IAEA Fusion Energy Conference» в 2010 году
 стендовый доклад.

 Конференция «Workshop on stochasticity in fusion plasmas» 2011– участие в двух устных докладах.

 Конференция «15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices 2015» – стендовый доклад.

 Конференция «WE-Heraeus-Seminar on Stochasticity in Fusion Plasmas» 2015 – стендовый доклад.

 Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС 2015 – стендовый доклад.

Конференция «21st Joint EU-US Transport Task Force Meeting» в 2016
 году – приглашенный устный доклад.

 Конференция «WE-Heraeus-Seminar on Impact of 3D magnetic fields on hot plasmas» 2017 – приглашенный устный доклад.

#### Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, приложения, списка цитируемой литературы из 115 наименований, и 48 рисунков. Общий объем диссертации – 175 страниц.

#### Основное содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, кратко изложено содержание глав.

Глава 1 посвящена описанию теории формирования электрического поля в тороидально симметричной плазме токамака и неоклассической радиальной проводимости. В разделе 1.1 рассмотрено формирование неоклассического электрического поля

$$E_r = E_r^{NEO} = \frac{T_i}{e} \left(\frac{d\ln n}{dr} + k_T \frac{d\ln T_i}{dr}\right) + B_{\theta} U_T$$
(1)

при учете турбулентного переноса импульса в тороидально симметричном случае. Здесь n -концентрация,  $T_i$  - температура ионов,  $k_T$  - численный коэффициент, зависящий от частоты столкновений,  $U_T$  - скорость тороидального вращения,  $B_{\theta}$  - полоидальное магнитное поле. Рассмотрен упрощенный случай круглого токамака с большим аспектным отношением [32]. Приведены результаты экспериментальных измерений [5, 6, 7, 8], подтверждающие неоклассический характер поля. В **разделе 1.2** приведены результаты гидродинамического моделирования электрического поля кодами B2SOLPS и SOLPS-ITER в реальной геометрии диверторного токамака [1а-13а]. Область моделирования включает слой плазмы толщиной несколько сантиметров внутри и снаружи сепаратрисы, турбулентный перенос учитывается с помощью увеличения до характерных аномальных значений коэффициентов диффузии, теплопроводности и поперечной вязкости. Моделирование подтверждает, что электрическое поле на замкнутых магнитных поверхностях внутри сепаратрисы оказывается близко к неоклассической величине, несмотря на включение в модель турбулентного переноса, за исключением переходного слоя шириной менее 1 см вблизи сепаратрисы. В **разделе 1.3** найдена аналитическая формула для ширины переходного слоя к неоклассическому электрическому полю вблизи внешней сепаратрисы токамака [4a, 6a, 11a] и вблизи сепаратрисы магнитного острова [14a, 15a]. Эта ширина

$$L_E = r \sqrt{\frac{B^2 \eta}{B_\theta^2 \mu_{i1}}} \tag{2}$$

зависит от турбулентной вязкости  $\eta$  и неоклассической продольной вязкости  $\mu_{\eta}$  [33]. В **разделе 1.4** изложена модель для неоклассической проводимости в экспериментах с электродом в упрощенной геометрии, а в **разделе 1.5** она проанализирована в реальной геометрии и проведено сравнение этой модели с результатами гидродинамического моделирования [16а, 17а]. В этих экспериментах снималась вольт-амперная характеристика электрода, помещенного внутрь последней замкнутой магнитной поверхности токамака, и таким образом измерялась радиальная проводимость плазмы. Показано, что существует два режима проводимости в зависимости от параметра

$$\kappa = \frac{3B_{\theta}^2}{2B^2} \frac{\mu_{i1}}{\eta} \frac{L^2}{R^2},$$
(3)

где *L* - радиальный масштаб, на котором протекает ток.

При  $\kappa <<1$  ток определяется неоклассической проводимостью [32]:

$$\langle j_r \rangle = \sigma_{NEO}(E_r - E_r^{NEO}),$$
(4)

$$\sigma_{NEO} = \frac{3\mu_{i1}}{\langle B^2 \rangle^2} \left\langle \left(\frac{\partial B}{r\partial \theta}\right)^2 \right\rangle \approx \frac{3\mu_{i1}}{2R^2B^2}.$$
(5)

Тороидальное вращение плазмы, входящее в выражение для неоклассического поля, при *к* << 1 меняется не сильно, так что отклонение электрического поля от неоклассического существенно больше, чем изменение самого электрического поля. При этом ток по плазме приводит к модификации ее полоидальной скорости.

Изменение тороидального вращения происходит за счет раскручивания плазмы тороидальной компонентой силы Ампера  $j_r B_{\theta}$ , и может быть оценено как

$$\Delta U_T \approx B_\theta < j_r > L^2 / \eta \tag{6}$$

При  $\kappa >> 1$  тороидальное раскручивание меняет неоклассическое электрическое поле на величину большую, чем отклонение электрического поля от неоклассического. Радиальный ток при этом можно оценить как  $\langle j_r \rangle \approx \tilde{\sigma}^{NEO} \Delta E_r$ , (7)

$$\tilde{\sigma}^{NEO} \approx \eta / B_{\theta}^2 L^2 \tag{8}$$

где  $\Delta E_r$  - изменение неоклассического электрического поля за счет тороидального раскручивания при протекании тока. Полоидальная скорость плазмы при протекании радиального тока при  $\kappa >> 1$  меняется слабо.

В Главе 2 изложена модель описания пристеночной плазмы при включении резонансных магнитных возмущений с учетом неоклассической проводимости. В разделе 2.1 приведен обзор экспериментальных данных. Эксперименты показывают модификацию электрического поля и тороидального вращения при включении RMP, и существенное уменьшение концентрации плазмы H-режиме при небольшой модификации профилей температур электронов и ионов [12-18]. В **разделе 2.2** дана аналитическая модель, описывающая электрическое поле, полоидальное и тороидальное вращение [18a, 19a] при RMP. Электрическое поле

$$E_r = \frac{\sigma_{St} E_r^{St} + \sigma_{NEO} E_r^{NEO}}{\sigma_{St} + \sigma_{NEO}}$$
(9)

определяется из условия квазинейтральности, где ионный ток (4) компенсируется током, возникающим из-за движения электронов вдоль силовых линий стохастизированного магнитного поля [33]

$$j_{r}^{e} = \sigma_{St} (E_{r} - E_{r}^{St}), \quad \sigma_{St} = i_{\sigma} n_{e} e^{2} D_{St} \sqrt{\frac{2}{\pi m_{e} T_{e}}}$$
(10)

$$E_r^{St} = -\left(\frac{T_e}{e}\frac{d\ln n_e}{dr} + 0.5\frac{T_e}{e}\frac{d\ln T_e}{dr}\right).$$
(11)

Здесь  $i_{\sigma} \leq 1$ ,  $D_{st}$  - коэффициент диффузии стохастического магнитого поля. Поскольку электронный ток не имеет проекции поперек магнитного поля, он не дает вклада в силу Ампера, и происходит тороидальное раскручивание плазмы по формуле (6) ионным током. Аналогично эксперименту с заряженным электродом решение зависит от параметра, определенного по формуле (3). Может возникать одна из четырех ситуаций:

1)  $\kappa < 1$ ,  $\sigma_{s_t} < \sigma_{NEO}$  -  $U_T$  и  $E_r$  не меняются существенно.

2)  $\kappa < 1$ ,  $\sigma_{St} > \sigma_{NEO}$  -  $U_T$  не меняется существенно, и  $E_r$  стремится к  $E_r^{St}$ ; 3)  $\kappa > 1$ ,  $\sigma_{St} < \sigma_{NEO}$  - изменение  $U_T$  и  $E_r$  зависит от масштаба

$$L_{\sigma} = \sqrt{\frac{\eta}{B_{\theta}^2} \left(\frac{1}{\sigma_{NEO}} + \frac{1}{\sigma_{St}}\right)} \quad .$$
(12)

Если  $L_{\sigma}$  больше, чем ширина стохастического слоя L, то  $U_{T}$  и  $E_{r}$  не поменяются существенно, в противоположном случае  $E_{r}$  стремится к  $E^{St}$ , а  $U_{T}$  стремится к предельному значению

$$U_{T}^{St} = -\frac{T_{e} + T_{i}}{B_{\theta}e} \frac{d\ln n_{e}}{dr} - 0.5 \frac{T_{e}}{B_{\theta}e} \frac{d\ln T_{e}}{dr} - k_{T} \frac{T_{i}}{B_{\theta}e} \frac{d\ln T_{i}}{dr}.$$
 (13)

4)  $\kappa > 1$ ,  $\sigma_{St} > \sigma_{NEO} - U_T$  стремится к предельному значению  $U_T^{St}$  и  $E_r$  стремится к  $E^{St}$ .

В разделе 2.3 проведено сравнение модели с экспериментальными результатами для токамака DIII-D [6,17]. Эксперимент соответствует случаю  $\kappa > 1$ ,  $\sigma_{St} \approx \sigma_{NEO}$  В согласии с предложенной моделью в присутствии RMP в эксперименте наблюдается тороидальное раскручивание и изменение радиального электрического поля без существенного изменения полоидального вращения плазмы. В разделе 2.4 на базе предложенной модели объяснены экспериментальные наблюдения на токамаке TУМАН-3М [35, 36] при возникновении магнитогидродинамической активности. Показано, что при такой активности происходит стохастизация магнитного поля вблизи границы плазмы. Модель предсказывает изменение электрического поля во всей плазме и потенциала в центре плазмы за счет модификации тороидального вращения.

В разделе 2.5 изложена аналитическая модель неоклассического механизм эффекта откачки при RMP [20a-23a]. Связанные с токами электронов и ионов потоки направлены из области транспортного барьера в сторону сепаратрисы. Дополнительный конвективный поток из плазмы равен

$$\Gamma^{St} = \frac{1}{e} \frac{\sigma_{NEO} \sigma_{St}}{\sigma_{NEO} + \sigma_{St}} (E_r^{St} - E_r^{NEO}) .$$
(14)

Он приводит к понижению концентрации плазмы в области пьедестала транспортного барьера и как следствие в центре плазмы. Градиент температуры электронов в транспортном барьере может совсем не поменяться, поскольку увеличение электронной теплопроводности по механизму Рочестера-Розенблюта [37] может быть полностью скомпенсировано уменьшением турбулентной аномальной теплопроводности электронов за счет уменьшения их концентрации.

В разделе 2.6 изложены результаты моделирования эффекта откачки кодом B2SOLPS5.2 для токамаков MAST и ASDEX-Upgrade. Моделирование воспроизводит изменение электрического поля и экспериментальный эффект откачки при почти постоянном профиле электронной температуры в токамаке MAST, если в тороидально-симметричную модель включить электронную проводимость (10), Рис.1.



Рис.1. Модельный и экспериментальный профили концентрации (a) и температуры (б) электронов на внешнем обводе токамака MAST в H-режиме со стохастическими эффектами ( $\sigma_{st} > 0$ ) и без них ( $\sigma_{st} = 0$ ).

Ионный конвективный поток при этом формируется за счет дрейфов, приводящих к неоклассической проводимости. В **разделе 2.7** проведен анализ сценария и результаты моделирования эффекта откачки и вращения плазмы для ИТЭР. ИТЭР будет работать в режиме «4» с существенным тороидальным раскручиванием плазмы и маленькой ионной неоклассической проводимостью. Электрическое поле при проникновении RMP в плазму согласно формуле (9) будет направлено из плазмы, а эффект откачки, формула (14), будет небольшим. В то же время теплопроводность Рочестера-Розенблюта увеличивается, поэтому можно ожидать уменьшения электронной температуры, и уменьшения градиента давления достаточного для подавления ELM.

В Главе 3 изложена аналитическая модель самосогласованного экранирования резонансных возмущений магнитных полей [24a-26a]. В разделе 3.1 приведен обзор экспериментальных данных, свидетельствующих о существовании экранирующих токов вблизи рациональных магнитных поверхностей и существенном экранировании внешних резонансных возмущений магнитного поля [19-22]. В разделе 3.2 описана модель экранирования резонансных возмущений, приводящих к стохастизации магнитного поля, учитывающая наличие неоклассической ионной проводимости. Электронный ток, компенсирующий ионный ток, связанный с этой проводимостью, течет вдоль силовых линий стохастизированного магнитного поля и поэтому имеет большую проекцию на тороидальное направление. Этот тороидальный ток приводит к экранированию внешнего возмущения магнитного поля. В то же время уровень возмущений магнитного поля влияет на стохастическую проводимость, выражение (10), и поэтому на электрическое поле, выражение (9), и на экранирующий радиальный ток.



Рис.2.(а) Области в пространстве параметров, соответствующие разным режимам экранирования RMP; (б) Зависимость от параметра σ, определяемого проводимостями в плазме, отношения радиального возмущения магнитного поля в плазме к его вакуумному значению.

В разделе 3.2 описано самосогласованное решение для электрического поля и уровня экранирования RMP. Решение зависит от безразмерных параметров

$$\alpha_{1} = \frac{L_{1}}{B} i_{\sigma} e^{2} n_{e} R \sqrt{\frac{2\pi}{m_{e} T_{e}}} \mu_{0} (E_{r}^{\text{NEO}} - E_{r}^{St}), \quad L_{1} = \frac{q}{2q' |n|}, \quad (15)$$

$$\sigma = \sigma_{St}^{vacuum} / \sigma_{NEO}.$$
 (16)

Здесь  $\sigma_{St}^{vacuum}$  - стохастическая проводимость (10), соответствующая уровню RMP без экранирования плазмой.

На Рис.2а показаны различные области в пространстве параметров: область I с одним решением без экранирования; область II с двумя решениями, одно из которых соответствует экранированию; область III с одним решением с экранированием  $\sigma_{st} / \sigma_{st}^{vacuum} = \alpha_1^{-2}$ . При постепенном увеличении вакуумного уровня RMP от 0 в случае  $\alpha_1 > 1$  сначала магнитные возмущения заэкранированы плазмой. Проникновение RMP происходит при достижении им порогового значения, Рис. 2б. Одновременно с проникновением RMP в плазму электрическое поле меняется от  $E_r^{NEO}$ , направленного в плазму до  $E_r^{St}$  направленного из плазмы. В случае  $\alpha_1 >> 1$  проникновение RMP в плазму носит характер бифуркации.

В разделе 3.3 описаны ограничения квазилинейной модели, использованной в предыдущем разделе. В разделе 3.4 проведен анализ аналогичного механизма экранирования отдельного магнитного острова, выведены параметры, аналогичные уравнениям (15) (16). В разделе 3.5 рассмотрено влияние вращения RMP на его экранирование плазмой. При вращении RMP возникает дополнительное вихревое электрическое поле, которое приводит к модификации параметра  $\alpha_1$ , выражение (15).

В разделе 3.6 приведено сравнение модели с экспериментальнми результатами и результатами моделирования. В Н-режимах в DIII-D[6,13,17], MAST[22a], ASDEX-Upgrade[12] параметры  $\sigma \sim \alpha_1 \sim 5-10$ , что соответствует границе перехода от экранирования к проникновению возмущений магнитного поля в плазму; электрическое поле модифицируется, но остается отрицательным, а сам переход происходит без бифуркации. В случае увеличения концентрации параметр  $\alpha_1$  возрастает, что приводит к наблюдаемому в эксперименте увеличению экранирования; радиальное электрическое поле при этом может быть близким к неоклассическому с незначительным эффектом откачки. Для больших RMP, характерных для работы динамического эргодического дивертора в токамаке TEX-TOR[16,19,21], параметры оказываются  $\sigma \sim 100$ ,  $\alpha_1 \sim 1-10$  что соответствует

отсутствию экранирования и положительному электрическому полю, наблюдавшимся в эксперименте. В **разделе 3.7** проведен анализ сценария экранирования RMP для ИТЭР. Для характерных параметров ИТЭР  $\sigma \sim \alpha_1 \sim 100$ , поэтому при достижении порогового значения тока в катушках, создающих RMP, переход к проникновению RMP в плазму будет происходить резко, и при последующем снижении тока в катушках переход к экранированию будет происходить при меньшем токе. Электрическое поле при проникновении RMP будет так же резко менять направление.

В Главе 4 изложена модель стохастизации магнитного поля и эффекта откачки плазмы при развитии филаментов в пристеночной области [27а-29а] сопровождающихЕLМ І рода. В разделе 4.1 приведен обзор экспериментальных данных. Согласно измерениям, на токамаке MAST в филаментах при движении их через область SOL существуют продольные токи 200-400А [38]. Потеря вещества из области транспортного барьера при ELM существенно превышает содержание плазмы в филаментах. С другой стороны, на токамаке ASDEX-Upgrade при ELM I рода наблюдалось изменение знака электрического поля [5]. В разделе 4.2 рассмотрены возможные дипольные, а в разделе 4.3 - однонаправленные токи в филаментах. Показано, что дипольные токи необходимы для замыкания тока, связанного с градиентным дрейфом при существующей динамике филамента. Однонаправленные токи не могут замыкаться через пластины дивертора, поскольку они превышают ток насыщения на пластины, и поэтому для них существует колебательное решение, действительно наблюдавшееся в эксперименте. В разделе 4.4 сделаны оценки характерных времен проникновения в плазму магнитных возмущений, связанных с диполь-

ными токами в филаментах. Линейная, а затем нелинейная стадии развития магнитных островов и последующая стохастизация магнитного поля в области транспортного барьера для типичных параметров MAST происходят на временах меньших, чем время жизни филамента, около 200 мкс. В **разделе 4.5** описана динамика радиального электрического поля при временной стохастизации магнитного поля и сделаны оценки для тороидального раскручивания плазмы и эффекта откачки. Найдено характерное время изменения электрического поля

$$\tau_{E} = \frac{n_{e}m_{i}(1+2q^{2})}{B^{2}(\sigma_{St}+\sigma_{NEO})}.$$
(17)

Это время оказывается больше времени жизни филамента, что надо учитывать при оценке конвективного потока ионов, приводящего к эффекту откачки

$$\Gamma = j_r^i / e = \sigma_{NEO}(E_r - E_r^{NEO}) / e + n_e m_i (1 + 2q^2) / eB^2 \partial E_r / \partial t.$$
(18)

В разделе 4.6 приведен сценарий динамического эффекта откачки при ELM I рода. Показано, что этот механизм позволяет объяснить дополнительную потерю вещества в ELM, выявленную в экспериментах на токамаке MAST.

В Главе 5 изложена модель для оценки радиальных конвективных потоков снаружи сепаратрисы, и их влияния на ширину SOL[30a-33a]. В разделе 5.1 рассчитывается конвективный вклад в радиальный перенос тепла электронов в SOL. Показано, что в режимах sheath-limited и conduction-limited минимальная ширина SOL для потока тепла электронов, определяемая дрейфовым конвективным переносом, оказывается близкой к  $L_q \approx q \rho_{ci}$ . Такая ширина близка к экспериментально измеренному скей-

лингу Эйха [30]. В разделе 5.2 рассмотрен конвективный вклад в радиальный перенос ионов в SOL. Показано, что при малой вариации давления в SOL и большой ионизации в диверторе конвективные потоки могут быть оценены аналогично потоку откачки при RMP. В SOL электрическое поле не неоклассическое, оно определяется перепадом потенциала в слое пространственного заряда и в диверторе. Возникает радиальный ток, который можно оценить по формуле (4), и соответствующий ионный поток. Ток замыкается через пластины дивертора. Если оценить минимальную ширину SOL для концентрации ионов, соответствующую их конвективному потоку, получаем опять оценку  $L_n \approx q \rho_{ci}$ . В разделе 5.3 приведены результаты моделирования пристеночной плазмы токамака ГЛОБУС-М с учетом самосогласованного распределения электрического потенциала и дрейфовых потоков. Проанализирован вклад различных слагаемых в потоки тепла электронов и радиальный перенос ионов в SOL. Показано, что при уменьшении аномальных коэффициентов переноса и уменьшении ширины SOL до величины близкой к  $q \rho_{ci}$  дрейфовый перенос тепла электронов и ионная конвекция действительно становятся одного порядка с аномальным переносом.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

#### Основные результаты работы

1) Построена модель электрического поля при стохастизации магнитного поля в плазме токамака при включении резонансных магнитных возмущений (RMP). Обнаружено два характерных режима, зависящих от

уровня турбулентного переноса импульса в плазме. В обоих режимах радиальное электрическое поле становится более положительным, чем неоклассическое поле. В режиме с большой поперечной вязкостью тороидальное вращение плазмы меняется незначительно, а электрическое поле при этом отклоняется от известного неоклассического решения. В режиме с маленькой поперечной вязкостью электрическое поле остается неоклассическим. Его изменение происходит за счет изменения тороидальной скорости, от которой зависит величина неоклассического поля.

2) Создана модель конвективного механизма уменьшения концентрации плазмы при RMP. Согласно этой модели электроны покидают плазму вдоль стохастических силовых линий магнитного поля, а ионы – благодаря конвекции поперек магнитного поля.

3) Построена модель экранирования RMP плазмой токамака. Экранирование определяется токами, связанными с движением электронов вдоль силовых линий стохастического магнитного поля при одновременном уходе ионов за счет конвективного радиального переноса. Обнаружено две области в пространстве параметров, одна из них - при относительно маленькой величине RMP, с существенным экранированием и электрическим полем, близким к неоклассической величине, вторая - при больших RMP, со слабым экранированием и электрическим полем, обеспечивающим удержание электронов в плазме.

4) Описан механизм ухода плазмы из области пьедестала транспортного барьера при крупномасштабных неустойчивостях (ELM) первого рода, связанный с временной стохастизацией магнитного поля в области транспортного барьера. К стохастизации магнитного поля приводят токи в филаментах, возникающих при ELM. Потери плазмы происходят за счет

эффекта, аналогичного эффекту откачки при RMP, с учетом динамических эффектов.

5) Создана модель конвективных механизмов радиального переноса плазмы снаружи от сепаратрисы. Показано, что чисто конвективные классические механизмы могут объяснить наблюдаемый в эксперименте характерный масштаб спада электронной температуры и концентрации в этой области.

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

[1a] Rozhansky V., Voskoboynikov S., Kovaltsova E. (Kaveeva E.), Coster D., Schneider R. Perpendicular conductivity and self-consistent electric fields in tokamak edge plasma // Contributions to Plasma Physics - 2000 - Vol.40 - P.423-430

[2a] Rozhansky V., Voskoboynikov S., Kovaltsova E. (Kaveeva E.), D. Coster, R. Schneider. Modeling of self-consistent electric fields in tokamek edge plasma with B2.5 code // Proceedings of the 26<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Maastricht - 1999 - ECA Vol. 23J - P.1749-1752

[3a] Rozhansky V., Voskoboynikov S., Kaveeva E., Coster D., Schneider R. Simulation of tokamak edge plasma including self-consistent electric fields // Nuclear Fusion - 2001 - Vol.41,№4 - P.387-401

[4a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Coster D., Bonnin X., Schneider R. The structure of the radial electric field in the vicinity of the separatrix and the L-H transition // Contributions to Plasma Physics - 2002 - Vol. 42  $N_{2}-4$ , P.230-235

[5a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Coster D., Bonnin X., Schneider R. Modelling of electric fields in tokamak edge plasma and L-H transition // Proceedings of the 28<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Madeira - 2001 - ECA Vol. 25A - P.1457-1460

[6a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Coster D., Bonnin X., Schneider R. Modeling of electric fields in tokamak edge plasma and L-H transition // Nuclear Fusion - 2002 - Vol.42 №8 - P.1110-1115

[7a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Coster D., Bonnin X., Schneider R. Potentials and currents in the edge tokamak plasma: simplified approach and comparison with two-dimensional modeling // Nuclear Fusion -2003 - Vol.43 №7 - P.614- 621

[8a] Kiviniemi T.P., Sipila S.K., Rozhansky V.A., Voskoboynikov S.P., **Kaveeva E.G.,** Heikkinen J.A., Coster D. P., Schneider R., Bonnin X. Neoclassical nature of the radial electric field at the low-to-high transition // Physics of Plasmas - 2003 - Vol.10  $N_{2}$  6 - P.2604-2607

[9a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Counsell G., Kirk A., Coster D., Schneider R. Simulation of neoclassical effects with B2SOLPS5.0 for MAST // Proceedings of the 31<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, London - 2004 - ECA Vol. 28B - P4.198

[10a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Counsell G., Kirk A., Meyer H., Coster D., Conway G., Schirmer J., Schneider R. Impact of magnetic configuration on edge radial electric field: MAST-ASDEX Upgrade simulation with B2SOLPS5.0 // Proceedings of the 32<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Tarragona - 2005 - ECA Vol. 29BC - P2.017

[11a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Counsell G., Kirk A., Meyer H., Coster D., Conway G., Schirmer J., Schneider R. Modelling of radial electric field profile for different divertor configurations // Plasma Physics Controlled Fusion - 2006 - Vol. 48 P.1425-1435

[12a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Coster D. and the ASDEX Upgrade team. Modelling of the radial electric field in the ASDEX Upgrade Ohmic shots // Contributions to plasma physics - 2008 - Vol.48 P73-76

[13a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Coster D., Wolfrum E.,, Wieland B., Puetterich T. and the ASDEX Upgrade team. Simulation of edge radial electric fields in H-regimes of ASDEX-Upgrade // Journal of Nuclear Materials - 2011 - Vol. 415 - P. S593-S596

[14a] Rozhansky V., **Kaveeva E.** Poloidal and Toroidal Rotations near Magnetic Islands and Transport Barrier Formation // Proceedings of the 30<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St.Petersburg - 2003 -ECA Vol. 27A - P3.150

[15а] **Кавеева Е. Г.,** Рожанский В. А. Полоидальные и тороидальные потоки в плазме токамака вблизи магнитного острова // Письма в журнал технической физики - 2004 - Т.30 (вып. 13) - С. 19-24 (Poloidal and toroidal fluxes in the tokamak plasma in the vicinity of magnetic island // Tech. Phys. Lett. - 2004 - Vol. 30 - p. 19-24)

[16a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Coster D., Bonnin X., Schneider R. Radial electric field in the biasing experiments and effective conductivity in a tokamak // Proceedings of the 29<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Montreux - 2002 - ECA Vol. 26B - P4.089

[17a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Coster D., Bonnin X., Schneider R. Radial electric field in the biasing experiments and effective conductivity in a tokamak // Physics of Plasmas- 2002 - Vol.9 №8 - P.3385-3394 [18a]. **Kaveeva E.,** Rozhansky V. and Tendler M. Interpretation of the observed radial electric field inversion in TUMAN-3M tokamak during MHD-activity // Nuclear Fusion - 2008 - Vol.48 - 075003(4pp)

[19a] **Kaveeva E.** and Rozhansky V. When poloidal rotation in a tokamak remains neoclassical in the presence of resonant magnetic perturbations// Plasma Physics and Controlled Fusion - 2014 - Vol.56 125015 (5pp)

[20a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Molchanov P., Veselova I., Voskoboynikov S., Coster D., Kirk A., Lisgo S., Nardon E.. Modification of the edge transport barrier by resonant magnetic perturbations // Nuclear Fusion - 2010 - Vol. 50 034005(7pp)

[21a] Rozhansky V., Molchanov P., **Kaveeva E.,** Voskoboynikov S., Kirk A., Nardon E., Coster D., Tendler M. Modeling of the Edge Plasma of MAST in the Presence of Resonant Magnetic Perturbations // Proceedings of the 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon - 2010 - THC/P3-06

[22a] Rozhansky V., Molchanov P., Kaveeva E., Voskoboynikov S., Kirk A., Nardon E., Coster D., Tendler M. Modeling of the Edge Plasma of MAST in the Presence of Resonant Magnetic Perturbations // Nuclear Fusion -2011- Vol. 51 - 083009 (6pp)

[23a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Veselova I., Voskoboynikov S. and Coster D. Modeling of ITER Edge Plasma in the Presence of Resonant Magnetic Perturbations// Contributions to plasma physics - 2016 - Vol.56 - P.587-591

[24a] **Kaveeva E.,** Rozhansky V., Tendler M. Mechanism of resonant magnetic perturbation screening // Proceedings of the 37<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Dublin - 2010 - ECA Vol. 34A - P2.139

[25a] **Kaveeva E.** and Rozhansky V. Screening of resonant magnetic perturbations taking into account a self-consistent electric field // Nuclear Fusion -2012vol 52 - 054011 (9pp)

[26a] Becoulet M., Orain F., Maget P., Mellet N., Garbet X., Nardon E., Huysmans G.T.A., Casper T., Loarte A., Cahyna P., Smolyakov A., Waelbroeck F.L., Schaffer M., Evans T., Liang Y., Schmitz O., Beurskens M., Rozhansky V. and **Kaveeva E.** Screening of resonant magnetic perturbations by flows in tokamaks// Nuclear Fusion - 2012- Vol. 52 - 054003 (16pp)

[27a] Rozhansky V., **Kaveeva E.** and Tendler M. Stochastization and pumpout in edge plasma caused by edge localized modes // Plasma Physics and Controlled Fusion - 2015 - Vol.57 - 115007

[28a] Rozhansky V., **Kaveeva E.** and Tendler M. Stochastization and pumpout in edge plasma caused by ELMs // Proceedings of the 42<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, 2015 Lisbon - 2015 - ECA Vol. 39E O2.108 (4pp)

[29а]. Рожанский В. А., **Кавеева Е. Г.,** Тендлер М.Б. Электрические поля и потоки, связанные с неоклассической проводимостью в токамаках// Известия академии наук - Энергетика - N4 - 2016 - стр. 3-24

[30a] Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Senichenkov I. and Vekshina E. Structure of the classical scrape-off layer of a tokamak // Plasma Physics and Controlled Fusion - 2018 - Vol. 60 - 035001

[31a] Meier E.T., Goldston R.J., Kaveeva E.G., Makowski M.A., Mordijck S.,Rozhansky V.A., Senichenkov I. Yu. and Voskoboynikov S.P. Analysis of drift

effects on the tokamak power scrape-off width using SOLPS-ITER// Plasma Physics and Controlled Fusion - 2016 - Vol.58 - 125012

[32a] Vekshina E., Senichenkov I., Rozhansky V., **Kaveeva E.,** Khromov N., Kurskiev G., Patrov M. and Globus-M team. Globus-M plasma edge modeling with B2SOLPS5.2 code// Plasma Physics and Controlled Fusion - 2016 - Vol.58 - 085007

[33a] **Kaveeva E.,** Rozhansky V. Drift Mechanism of Scrape-Off Layer Formation in a Tokamak//

Technical Physics Letters - 2018 - Vol 44 - p 235-238

# Список цитируемой литературы

[1] Diamond P.H., Liang Y.-M., Carreras B. A., Terry P. W., Self-regulating shear flow turbulence: a paradigm for the L to H transition // Physical Review Letters - 1994 - Vol.72 - P. 2565

[2] Wagner F. A quarter-century of H-mode studies //Plasma Physics and Controlled Fusion - 2007 - Vol. 49 - P. B1-B33

[3] Galeev A. A., Sagdeev R. Z. Transport Phenomena in a collisionless plasma in a toroidal magnetic system// Soviet Physics JETP - 1968 - Vol. 26 - P.233

[4] Rozhansky V. Understanding transport barriers through modelling// Plasma Physics and Controlled Fusion - 2004 - Vol. 46 - P.A1-A17

[5] Viezzer E., Putterich T., Conway G.D., Dux R., Happel T., Fuchs J.C., McDermott R.M., Ryter F., Sieglin B., Suttrop W., Willensdorfer M., Wolfrum E. and the ASDEX Upgrade Team, High-accuracy characterization of the edge radial electric field at ASDEX Upgrade// Nuclear Fusion - 2013 -Vol. 53 -053005

[6] Moyer R.A. Plasma Rotation and Radial Electric Field Response to Resonant Magnetic Perturbations in DIII-D // Presented at the 54th Annual APS Meeting Division of Plasma Physics Providence, Rhode Island October 29 — November 2, 2012

[7] McDermott R. M., Lipschultz B., Hughes J. W. *et al.* Edge radial electric field structure and its connections to H-mode confinement in Alcator C-Mod plasmas // Physics of Plasmas - 2009 - Vol.16 - 056103

[8] Meyer H. The structure, evolution and role of the radial edge electric field in H-mode and L-mode on MAST // 11th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series - 2008- Vol.123 - 012005

[9] Kirk A., Ben Ayed N., Counsell G. *et al.* Filament structures at the plasma edge on MAST // Plasma Physics and Controlled Fusion - 2006 - Vol.48 - P. B433

[10] Scannell R., Kirk A., Ben Ayed N., *et al.* Experimental investigation into ELM filament formation on MAST// Plasma Physics and Controlled Fusion - 2007 - Vol. 49 - P.1431-144

[11] Zhitlukhin A., Klimov N., Landman I. *et al.* Effects of ELMs on ITER divertor armour materials // Journal of Nuclear Materials - 2007 - Vol.363-365 - P.301-307

[12] Suttrop W., Kirk A., Bobkov V. *et al.* Experimental conditions to suppress edge localised modes by magnetic perturbations in the ASDEX Upgrade tokamak// Nuclear Fusion -2018 - Vol.58 - 096031

[13] Evans T.E., Fenstermacher M.E., Moyer R.A. *et al.* RMP ELM suppression in DIII-D plasmas with ITER similar shapes and collisionalities// Nuclear Fusion - 2008- Vol.48 - 024002

[14] Liang Y., Koslowski H.R., Thomas P. R. *et al.* Active Control of Type-I Edge-Localized Modes with n=1 Perturbation Fields in the JET Tokamak // Phys. Review Letters -2007- Vol.98 - 265004

[15] Sun Y., Liang Y., Liu Y. Q. *et al.* Nonlinear Transition from Mitigation to Suppression of the Edge Localized Mode with Resonant Magnetic Perturbations in the EAST Tokamak //Phys. Review Letters - 2016 - Vol.117 - 115001

[16] Unterberg B., Busch C., de Bock M. *et al.* Impact of stochastic magnetic fields on plasma rotation and radial electric fields in the plasma edge of the tokamak TEXTOR// Journal of Nuclear Materials -2007 - Vol. 363 - P. 698

[17] Mordijck S., Moyer R.A., Ferraro N.M., Wade M.R. and Osborne T.H. The radial electric field as a measure for field penetration of resonant magnetic perturbations// Nuclear Fusion - 2014 - Vol. 54 - 082003

Mordijck S. Particle transport as a result of resonant magnetic perturbations// Ph.D. Thesis - 2011 (University of California, San Diego)

[18] Conway G. D., Fietz S., Muller H.W. *et al.* Impact of magnetic perturbation coils on the edge radial electric field in ASDEX Upgrade// Proc. 40 EPS Conf. on Plasma Physics, Epsoo, Finland - 2013 -ECA 37D - P5.175

[19] Kikuchi Y. de Bock M. F. M., Finken K. H. *et al.* Forced Magnetic Reconnection and Field Penetration of an Externally Applied Rotating Helical Magnetic Field in the TEXTOR Tokamak // Phys. Review Letters - 2006 - Vol. 97 - 085003

[20] Becoulet M. *et al.* Physics of penetration of resonant magnetic perturbations used for Type I edge localized modes suppression in tokamaks// Nuclear Fusion - 2009 - Vol.49 - 085011

[21] Denner P., Liang Y., Yang Y., Rack M., Zeng L., Pearson J., Xu Y. and the TEXTOR Team, Local measurements of screening currents driven by applied RMPs on TEXTOR //Nuclear Fusion - 2014 - Vol.54 - 064003

[22] Nazikian R., Paz-Soldan C., Callen J. D. *et al.* Pedestal bifurcation and resonant field penetration at the threshold of Edge-Localized Mode suppression in the DIII-D Tokamak // Phys.Review Letters - 2015 - Vol.114 - 105002

[23] Fitzpatrick R. and Hender T. C. The interaction of resonant magnetic perturbations with rotating plasmas // Physics of Fluids B - 1991 - Vol.3 - P.644-673

[24] Waelbroeck F.L., Joseph I., Nardon E., Becoulet M. and Fitzpatrick R. Role of singular layers in the plasma response to resonant magnetic perturbations // Nucl. Fusion - 2012 - 52 - 074004 (14pp)

[25] Nardon E., Tamain P., Bécoulet M., Huysmans G. and Waelbroeck F.L. Quasi-linear MHD modelling of H-mode plasma response to resonant magnetic perturbations // Nuclear Fusion - 2010 - Vol.50 - 034002

[26] Yu Q. and Gunter S. Plasma response to externally applied resonant magnetic perturbations // Nuclear Fusion - 2011 - Vol.51 - 073030

[27] Strauss H.R., Sugiyama L., Park G.Y., Chang C.S., Ku S. and Joseph I. Extended MHD simulation of resonant magnetic perturbations// Nuclear Fusion - 2009 - Vol.49 - 055025 (8pp)

[28] Li L., Liu Y. Q., Wang N. *et al.* Toroidal modeling of plasma response to RMP fields in ITER // Plasma Physics and Controlled Fusion - 2017 - 59 - 044005 (18pp)

[29] Orain F., Hölzl M., Viezzer E. *et al.* Non-linear modeling of the plasma response to RMPs in ASDEX Upgrade // Nuclear Fusion - 2017 - Vol.57 - 022013 (13pp)

[30] T. Eich, A.W. Leonard, R.A. Pitts *et al.* Scaling of the tokamak near the scrape-off layer H-mode power width and implications for ITER// Nuclear Fusion - 2013 - 53 - 093031 (7pp)

[31] Goldston R.J. Heuristic drift-based model of the power scrape-off width in low-gaspuff H-mode tokamaks// Nuclear Fusion - 2012 - Vol.52 - 013009 (7pp) [32] Rozhansky V. and Tendler M. Plasma rotation in tokamaks // Reviews of Plasma Physics - 1996 - Vol. 19, ed. B.B. Kadomtsev, (New-York - London: Consultants Bureau) p. 147-249 4. Hirshman S. P. and Sigmar D. J. Neoclassical transport of impurities in tokamak plasmas // Nuclear Fusion - 1981 - Vol. 21- P. 1079

[33] Hirshman S. P. and Sigmar D. J. Neoclassical transport of impurities in tokamak plasmas // Nuclear Fusion - 1981 - Vol. 21- P. 1079

[34] Kaganovich I. and Rozhansky V. Transverse conductivity in a braided magnetic field // Physics of Plasmas - 1998 - Vol. 5 - 3901

[35] Bulanin V. *et al.* Plasma rotation evolution near the peripheral transport barrier in the presence of low-frequency MHD bursts in TUMAN-3M tokamak// Plasma Physics and Controlled Fusion - 2006 - Vol.48 - A101

[36] Askinasi L. et al. // Proc. 34th EPS Conf. on Plasma Physics, Warsaw, Poland - 2007 - P-5.092

[37] Rechester A. B., Rosenbluth M. N. Electron Heat Transport in a Tokamak with Destroyed Magnetic Surfaces// Phys. Review Letters - 1978 - Vol.40 - P. 38

[38] Furno I., Spolaore M., Theiler C., Vianello N., Cavazzana R., and Fasoli A. Direct two-dimensional measurements of the field-aligned current associated with plasma blobs// Phys. Review Letters - 2011 - Vol.106 - 245001