

Белокуров Александр Александрович

**ВЛИЯНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЫ И
ИНЖЕКЦИИ МАКРОЧАСТИЦЫ НА ДИНАМИКУ L-N ПЕРЕХОДА В
ТОКАМАКЕ**

1.3.9 физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2022 год

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

д.ф.-м.н.
с.н.с.
Аскинази Леонид Георгиевич
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н.
профессор
Кавеева Елизавета Геннадьевна
ФГАОУ ВО СПбПУ

к.ф.-м.н.
н.с.
Хабанов Филипп Олегович
ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация
ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им.
А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Защита состоится «13» октября 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, e-mail: post@mail.ioffe.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте www.ioffe.ru

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

А.В. Белашов

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы диссертации

Управляемый термоядерный синтез (УТС) является одним из перспективных направлений развития современной энергетики. Наибольший прогресс в работах по осуществлению УТС достигнут на установках типа токамак, продемонстрировавших наилучшее время удержания энергии. В настоящее время международным консорциумом с участием России создаётся крупнейший в мире токамак-реактор ITER, на котором планируется продемонстрировать УТС с положительным энергетическим выходом.

Режим улучшенного удержания, характеризующийся подавленным переносом тепла и частиц на периферии плазмы (или H-мода) в термоядерных установках [1, 2] является наиболее перспективным с точки зрения увеличения энергетического выхода режимом функционирования будущего токамака-реактора. Ожидается, что работа в H-моду станет приоритетной для токамака ITER, поэтому поиск условий и способов инициирования режима улучшенного удержания, т.е. управление удержанием плазмы, является одной из ключевых задач физики плазмы.

Улучшение удержания, согласно принятым в настоящее время теоретическим представлениям, связано с подавлением аномального (турбулентного) переноса неоднородным радиальным электрическим полем E_r [3]. Такая неоднородность приводит к радиально неоднородному полоидальному вращению плазмы, вследствие чего турбулентные вихри растягиваются и разрушаются, благодаря чему уменьшается радиальная корреляционная длина турбулентности, определяющая, в свою очередь, пространственный шаг турбулентной диффузии. Существует количественный критерий, позволяющий определить эффективность подавления турбулентного переноса

неоднородным E_r : $\gamma < \omega_E$ где $\omega_E = \left| \frac{R \cdot B_\theta}{B_T} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{E_r}{R \cdot B_\theta} \right) \right|$ – шир скорости полоидального

вращения, обусловленного дрейфом в скрещенных неоднородном радиальном электрическом и магнитном полях (в дальнейшем будет использована сокращенная формулировка «шир радиального электрического поля E_r »), зависящий также от тороидального и полоидального магнитного поля B_T и B_θ соответственно и большого радиуса токамака R ; γ , в зависимости от применяемого подхода к рассмотрению турбулентности, обозначает либо инкремент нарастания дрейфовой неустойчивости (в случае рассмотрения начальной стадии развития турбулентности), либо величину,

обратную корреляционному времени турбулентности (в случае рассмотрения насыщенного режима неустойчивости) [4].

Интерес к физике инициирования L-H перехода обусловлен двумя факторами. Во-первых, с фундаментальной точки зрения, исследование методов инициирования LH (а также и обратных, HL) переходов необходимо для создания полной физической модели переключения режима удержания. Во-вторых, с точки зрения осуществления УТС, необходимо разработать способы управления удержанием. Само по себе улучшение удержания энергии при переходе в H-моду, без сомнения, очень важно. Однако оно обычно сопровождается также и улучшением удержания частиц, что может привести к накоплению как тяжелых примесей, так и «гелиевой золы», формирующейся в результате D-T термоядерных реакций, что, в свою очередь, приводит к ухудшению качества разряда или даже срыву. Поэтому важно разработать методы контролируемого периодического ухудшения удержания частиц в разряде для периодического выброса накопившихся примесей. Одним из таких методов является управление т.н. краевой модой (ELM, *edge localized mode*). Контролируемое кратковременное отключение H-моды могло бы быть альтернативным методом управления удержанием.

В первых экспериментах на токамаке *ASDEX* наблюдался спонтанный переход в режим улучшенного удержания (L-H переход) в разрядах с дополнительным нагревом плазмы [2]. В дальнейшем инициирование перехода в режим улучшенного удержания путём создания в плазме специфического возмущения стало одной из важных задач УТС. Для этого применялись методы, при которых в плазме создавалось неоднородное E_r , такие как поляризация периферийной плазмы электродом, инжекция макрочастиц (пеллет), инициирование перехода в H-моду при контр-инжекции греющего нейтрального пучка за счёт потерь быстрых ионов, создающих неоднородное поле E_r . Было также обнаружено, что в некоторых случаях, особенно при высокой концентрации плазмы, переход в H-моду может происходить спонтанно, без дополнительного нагрева или существенного возмущения радиального электрического поля [5].

Шир радиального электрического поля, возникающий в результате возмущения E_r , является ключевым параметром для определения возможности инициирования L-H перехода с точки зрения физики подавления аномального переноса. При этом кратковременного возмущения E_r , инициирующего L-H переход, может оказаться недостаточно для существования самоподдерживающейся H-моды, так как необходимо, чтобы в плазме сохранялся низкий (подавленный) аномальный перенос и после перехода.

Важным параметром, определяющим возможность L-H перехода в конкретных экспериментальных условиях, является пороговая мощность нагрева [6]. Однако,

превышение порога по мощности нагрева – необходимое, но не достаточное условие L-H перехода: например, в токамаке ТУМАН-3М даже в омических разрядах критерий превышения порога по мощности нагрева выполняется всегда с большим запасом [5]. Эксперименты на токамаке ТУМАН-3М показывают, что помимо порога по мощности нагрева может существовать пороговая концентрация плазмы для L-H перехода [5]. При плотности плазмы ниже этого порогового значения L-H переход не развивается. Таким образом, возникает необходимость в универсальной модели переключения режимов удержания, которая бы учитывала зависимость от различных факторов. Одна из таких моделей представлена в работах [7, 8] и использует принцип, согласно которому при нелинейной зависимости коэффициентов переноса от градиентов концентрации и давления, а также от инкремента нарастания турбулентности, возможна бифуркация в уравнениях переноса, отражающая смену режима удержания. Возможность существования бифуркации определяется источниками частиц и тепла.

Современное состояние исследований инициирования L-H перехода позволяет установить основные факторы, влияющие на подавление турбулентного переноса. Тем не менее, некоторые особенности, такие как влияние источника частиц на фактическую возможность или невозможность инициирования L-H перехода, были недостаточно освещены, особенно учитывая отсутствие L-H перехода на некоторых установках (например Т-10, ФТ-2 в разрядах с низкой концентрацией, Tore Supra). Инициирование L-H перехода при инжекции пеллеты в большинстве работ, даже посвященных экспериментам на крупных «передовых» токамаках, описывалось почти исключительно в терминах снижения пороговой мощности L-H перехода, без описания физического механизма подавления турбулентности.

Исследование, которому посвящена данная работа, направлено на исследование факторов, определяющих возможность перехода в режим улучшенного удержания в плазме токамака, и проводилось на токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2, различающихся как размерами, так и параметрами плазмы, турбулентности и геодезической акустической моды (ГАМ). Важно проанализировать в рамках одной модели (построенной на основе принципов, изложенных в [8]) сценарии с ГАМ в этих токамаках, и выяснить причины различного влияния ГАМ на возможность L-H перехода. ГАМ наблюдается на обоих токамаках, однако в разрядах токамака ТУМАН-3М ГАМ может приводить к омическому L-H переходу, в то время как в токамаке ФТ-2 в характерных разрядах с ГАМ L-H переход не наблюдается. Важно также, чтобы данное описание было применимо в других режимах улучшенного удержания, таких как инициирование L-H перехода при тангенциальной

инжекции криогенной макрочастицы, или пеллеты (ТУМАН-3М), и режимы с экстремально высокой плотностью плазмы (ФТ-2).

Для анализа взаимосвязи возмущения радиального электрического поля и перехода в режим улучшенного удержания необходимо создать численную модель, позволяющую описывать разнообразие исследуемых сценариев и наблюдаемых явлений с общих позиций. В качестве отправной точки была выбрана модель [8], использующая нелинейную зависимость коэффициентов переноса от градиентов параметров плазмы. Численное моделирование и анализ экспериментальных сценариев на основе теоретических представлений, изложенных в [8], позволили рассмотреть разнообразные сценарии с точки зрения возможности и условий L-H перехода (в том числе и количественных) в рамках единого подхода. Этот подход позволяет, в принципе, прогнозировать возможность L-H перехода для других сценариев и установок. Таким образом, актуальность настоящего исследования не вызывает сомнений.

Цели и задачи

Целью данной работы является определение роли и взаимного влияния различных факторов (шира радиального электрического поля, свойств турбулентности и источника частиц), ответственных за переключение режима удержания в токамаке.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Проведение экспериментов с локализованным на периферии возмущением плотности плазмы при тангенциальной инжекции замороженной макрочастицы (пеллеты).
2. Создание транспортной модели, применимой к различным сценариям и различным токамакам, позволяющей рассчитать эволюцию профилей концентрации и ионной температуры плазмы с учётом зависимости коэффициентов переноса от неоднородности радиального электрического поля.
3. Анализ связи параметров ГАМ с возможностью инициирования L-H перехода в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2.
4. Анализ связи параметров пеллет-инжекции с возможностью инициирования L-H перехода в токамаке ТУМАН-3М.

Научная новизна работы

Впервые были проведены эксперименты по тангенциальной инжекции замороженной макрочастицы в токамаке с целью инициирования L-H перехода и исследования параметров и механизмов, ответственных за инициирование L-H перехода.

Впервые различные сценарии на различных токамаках (ГАМ и пеллет-инжекция в токамаке ТУМАН-3М с последующим L-H переходом или без него, ГАМ на ФТ-2 без L-H перехода) проанализированы и объяснены в рамках общих представлений о нелинейном характере коэффициента диффузии.

Впервые, на примере режимов с интенсивными колебаниями ГАМ и с L-H переходом на токамаке ТУМАН-3М и без такового на токамаке ФТ-2, проанализирована взаимосвязь различных факторов, влияющих на возможность перехода – таких, как возмущение шира радиального электрического поля и величина источника частиц.

Теоретическая и практическая значимость работы

Отработанная методика экспериментов по тангенциальной инжекции замороженной пеллеты в токамак ТУМАН-3М может быть использована в различных сценариях, направленных на инициирование перехода в режим улучшенного удержания.

Разработанная транспортная модель эволюции профилей концентрации и ионной температуры может быть применена к другим сценариям, например сценариям с нейтральным нагревом, и к другим токамакам. Общность результатов, полученная в результате работы, подтверждает универсальность модели. Анализ разнообразных сценариев при помощи разработанной модели позволяет предсказать сочетание параметров плазмы, необходимое в том или ином сценарии для достижения режима улучшенного удержания.

Методология и методы исследования

Экспериментальные результаты, лежащие в основе данной работы, были получены на токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2 в режимах с омическим нагревом плазмы; также для токамака ТУМАН-3М был использован комплекс инжекции криогенных макрочастиц. Данные были получены с помощью таких диагностик, как диагностика пучком тяжёлых ионов, диагностика обратного доплеровского рассеяния и доплеровской рефлектометрии, зондовая диагностика, интерферометрическая диагностика, оптическая диагностика свечения линий $H\alpha/D\alpha$. Численное моделирование экспериментальных сценариев проводилось с помощью специально разработанного программного обеспечения, а также с привлечением транспортных и gyroкинетических кодов.

Положения, выносимые на защиту

- Создана модель L-H перехода, позволяющая описать в рамках общего подхода эксперименты на токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2 по исследованию взаимосвязи колебаний ГАМ и наличия/отсутствия L-H перехода, а также эксперименты на токамаке ТУМАН-3М по инициированию L-H перехода при тангенциальной инжекции замороженной водородной макрочастицы.
- Установлена критическая роль возмущения источника частиц в экспериментах по инициированию L-H перехода при тангенциальной инжекции замороженной водородной макрочастицы в токамаке ТУМАН-3М.
- Установлено наличие связи между пороговым уровнем источника частиц, широм радиального электрического поля и свойствами турбулентности – ключевыми факторами, влияющими на инициирование перехода в режим улучшенного удержания.

Достоверность научных результатов

Полученные в результате работы результаты являются экспериментально обоснованными; моделируемые сценарии используют преимущественно экспериментальные данные. Достоверность модели подтверждается успешным применением ее для описания различных режимов на двух токамаках – ТУМАН-3М и ФТ-2. Достоверность результатов обеспечивается многократно повторёнными измерениями и сравнением результатов различных диагностик.

Апробация работы и публикации

Результаты и материалы, вошедшие в диссертацию, были обсуждены на научных семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе и симпозиумах, проводимых Helsinki Aalto University (Финляндия), представлены на российских и международных конференциях:

- EPS Conference on Plasma Physics (2014, 2015, 2016, 2017 гг.)
- IAEA Fusion Energy Conference (2014 г.)
- Advances and Applications in Plasma Physics (2019 г.)
- Int. Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (2017 г.)
- Звенигородская (Международная) конференция по физике плазмы и УТС (2014, 2016, 2017, 2019 гг.)

Результаты и материалы, изложенные в диссертации, опубликованы в ведущих рецензируемых журналах по физике плазмы и УТС: «Nuclear Fusion», «Plasma Physics and Controlled Fusion», «Письма в Журнал Технической Физики».

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, в котором показаны актуальность и степень разработанности темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, показана достоверность научных результатов, указан личный вклад автора, апробация работы и список публикаций автора по теме диссертации (16 работ, из которых 11 индексированы WoS); основная часть диссертации состоит из четырех глав и заключения, содержит 104 страницы и 54 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 90 источников.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты были получены автором или же при его непосредственном участии. При непосредственном участии автора проведены эксперименты по инжекции криогенной пеллеты в токамак ТУМАН-3М (подбор режимов инжекции, подготовка и настройка экспериментального оборудования, обработка результатов).

Для исследования возможности инициирования L-H перехода автором лично была разработана численная модель, рассчитывающая эволюцию профилей концентрации и ионной температуры плазмы при различных возмущениях (переменное или постоянное локализованное возмущение радиального электрического поля, источника частиц). Автором был проведён анализ возможности существования различных режимов удержания, применённый в сценариях с ГАМ на токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2, сценариях с инжекцией пеллеты на токамаке ТУМАН-3М, и сценариях с высокой концентрацией плазмы в токамаке ФТ-2.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Во **введении** к диссертации обоснована актуальность исследований в сфере физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза, отмечена степень разработанности темы диссертации. Сформулирована цель данной работы - определение роли различных факторов (взаимосвязи величины шира радиального электрического поля, уровня турбулентности и источника частиц), ответственных за переключение режима удержания в токамаке. Поставлены задачи, выполнение которых необходимо для достижения цели данной работы, а именно: проведение экспериментов с локализованным на периферии возмущением плотности плазмы при тангенциальной инжекции

замороженной пеллеты; создание транспортной модели, применимой к различным сценариям и различным токамакам, позволяющей рассчитать эволюцию профилей концентрации и ионной температуры плазмы с учётом зависимости коэффициентов переноса от неоднородности радиального электрического поля; анализ связи параметров ГАМ с возможностью инициирования L-H перехода в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2; анализ связи параметров пеллет-инжекции с возможностью инициирования L-H перехода в токамаке ТУМАН-3М. Также в этом разделе отмечена научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, указаны методология и методы исследования. Далее сформулированы положения, выносимые на защиту, отмечена достоверность научных результатов, указан личный вклад автора, а также апробация работы и список основных публикаций по теме диссертации.

В **первой главе**, представляющей собой обзор литературы, в **параграфе 1.1** отражено современное состояние исследований аномального (турбулентного) переноса в токамаке, причин и особенностей перехода в режим улучшенного удержания, а также роль неоднородности радиального электрического поля как основного фактора, приводящего к подавлению турбулентного переноса и инициированию перехода в режим улучшенного удержания.

В **параграфе 1.2** рассмотрены основные экспериментальные сценарии, в которых возникает возмущение радиального электрического поля, приводящее к инициированию перехода в H-моду, если выполняется критерий $\omega_{ExB} > \gamma$. Результаты экспериментов указывают на то, что помимо величины шира E_r (и пороговой мощности нагрева P_{thr}) возможность L-H перехода также определяются величиной пороговой концентрации (т.е. источником частиц) и свойствами турбулентности. Далее в этом параграфе рассматривается теоретический подход, описывающий бифуркацию в уравнениях переноса частиц и ионного тепла с нелинейной зависимостью потока частиц и тепла от градиента концентрации и давления соответственно. Коэффициенты диффузии и температуропроводности при этом пропорциональны множителю $\left(k_{D,\chi}(r) + \frac{1}{1 + (\omega_{ExB}(r,t)/\gamma)^2} \right)$, где $k_{D,\chi}(r)$ – отношение подавленного (неоклассического) и аномального коэффициентов диффузии и температуропроводности (обычно $k \ll 1$), ω_{ExB} – шир E_r , γ – инкремент нарастания турбулентности. В рамках данного подхода оказывается возможным учесть влияние всех указанных факторов (шир E_r , источники тепла и частиц, инкремент нарастания турбулентности).

Наименее исследованными сценариями, с точки зрения возможности инициирования L-H перехода, оказываются сценарии с колебаниями геодезической акустической моды (ГАМ) и сценарии с пеллет-инжекцией. В **параграфе 1.3** изложены общие сведения о ГАМ, а также результаты экспериментов по исследованию ГАМ на токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2, описаны параметры разрядов с ГАМ и методика проведения экспериментов. В обоих токамаках ГАМ наблюдаются в ограниченной области значений малого радиуса, при этом в токамаке ТУМАН-3М активность ГАМ предшествует переходу в H-моду и, возможно, является его причиной, а в токамаке ФТ-2 в режимах с ГАМ L-H переход не происходит.

В **параграфе 1.4** описаны эксперименты по инициированию перехода в H-моду в разрядах с пеллет-инжекцией, начиная с экспериментов на токамаке ТУМАН-3М. Далее описаны исследования на токамаке T-10, а также – эксперименты на токамаках DIII-D, MAST и EAST. Отмечается, что в большинстве работ использовался феноменологический критерий L-H перехода, требующий превышения порога по мощности нагрева $P > P_{\text{threshold}}$, и детально исследовалось снижение пороговой мощности L-H перехода $P_{\text{threshold}}$ при испарении пеллеты. При этом физические процессы, приводящие к улучшению удержания при испарении пеллеты, оставались не исследованными.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию сценариев с ГАМ [A2–A5, A9–A12, A14–A16]. В **параграфе 2.1** описана численная модель, построенная для исследования возможности инициирования L-H перехода вспышкой ГАМ, на основе представлений, изложенных в параграфе 1.2 обзора литературы. Для параметров разряда токамака ТУМАН-3М, близких к экспериментальным, моделируется эволюция профиля концентрации, определяемая локализованным возмущением радиального электрического поля. Коэффициент диффузии D_{eff} выбран в виде, учитывающем зависимость от отношения шири радиального электрического поля к инкременту нарастания турбулентности согласно принципам, изложенным в параграфе 1.2, что позволяет моделировать локальное подавление аномальной диффузии широм E_r и обеспечивает существование двух стационарных решений, соответствующих L-моду и H-моду (в последнем случае профиль концентрации имеет характерное локальное увеличение градиента на периферии, т.н. транспортный барьер). Важной особенностью расчётов является то, что входные данные для модели преимущественно взяты из эксперимента с целью минимизации количества «свободных параметров».

Для получения данных о тех параметрах, которые неизвестны из эксперимента (например, инкремент нарастания турбулентности), применялся описанный в **параграфе 2.2** гирокинетический код ELMFIRE. В модели также использовалось предположение о

быстром (за время порядка γ^{-1}) отклике турбулентности на изменение шири E_r ; данная гипотеза была подтверждена с помощью кода ELMFIRE [A12].

В параграфе 2.3 изложены результаты расчётов, полученных в транспортной модели для токамака ТУМАН-3М, а также описаны эксперименты с помощью диагностического пучка тяжёлых ионов и доплеровской рефлектометрии, на основании результатов которых определены параметры ГАМ, использованные в модели. Для экспериментальных (и близких к ним) параметров разряда показано, что вспышка ГАМ может инициировать самоподдерживающийся L-H переход, если амплитуда или длительность вспышки ГАМ превышают некоторое пороговое значение, зависящее в свою очередь от набора параметров ГАМ (амплитуда, частота, длина волны) и плазмы (в первую очередь – ионной температуры). Пример таких расчётов приведен на рис. 1. С помощью моделирования данные пороговые значения определены в некотором диапазоне значений параметров ГАМ и плазмы, близких к экспериментальным: для ГАМ с частотой 30 кГц и длиной волны 1.2 см для амплитуды 4.5 кВ/м превышение амплитудой $E_{\text{ГАМ}}$ пороговой при значениях ионной температуры в области локализации ГАМ выше примерно 26 эВ, т.е. при $T_i(0) \approx 190$ эВ, что соответствует экспериментальному диапазону значений T_i в токамаке ТУМАН-3М.

Следует отметить результат, указывающий на то, вспышка ГАМ меньшей частоты способствует более эффективному инициированию L-H перехода по сравнению с более высокочастотными ГАМ. Этот результат согласуется с наблюдениями в некоторых экспериментах на токамаке ТУМАН-3М, где перед переходом в H-моду наблюдалось снижение частоты ГАМ примерно с 33 кГц до 22.5 кГц. Более подробно этот сценарий разобран в параграфе 2.4.

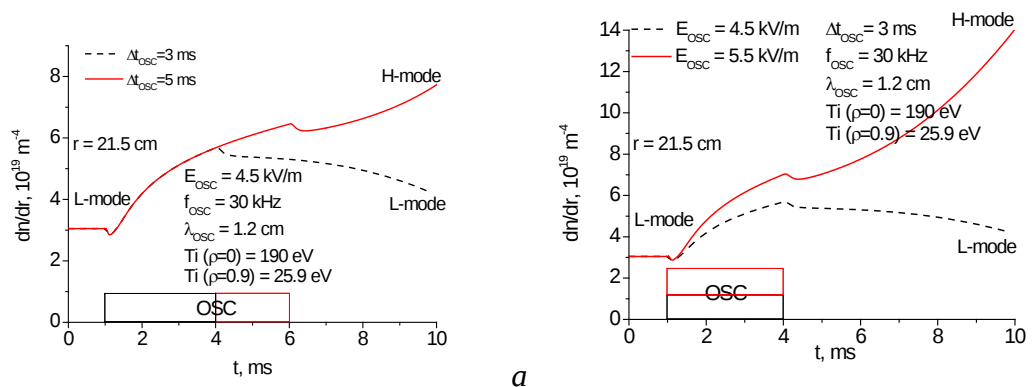


Рис. 1. Результаты моделирования – эволюция периферийного градиента концентрации в токамаке ТУМАН-3М под воздействием возмущения радиального электрического поля при ГАМ: а) вспышки ГАМ разной длительности и б) разной амплитуды. Если длительность (а) или амплитуда (б) вспышки ГАМ превосходят

определенные пороговые значения, происходит L-H переход, характеризующийся ростом градиента концентрации после окончания вспышки ГАМ [A9].

Сравнению с экспериментом на токамаке ТУМАН-3М посвящён **параграф 2.4**. В данном параграфе показаны результаты моделирования двух сценариев с активностью ГАМ и L-H переходом [A4]. В этих сценариях ГАМ существует, как это видно из экспериментов, в виде серий отдельных коротких вспышек, каждая из которых изолированно не может привести к L-H переходу. Первый сценарий представляет собой серию последовательных вспышек с уменьшающейся частотой в пределах 33 - 22.5 кГц, второй сценарий – длительную эволюцию ГАМ в виде отдельных вспышек с модулированной амплитудой. Результаты моделирования для данных сценариев хорошо совпадают с экспериментом – последовательность вспышек ГАМ совокупно создаёт условия для инициирования L-H перехода за время, близкое к наблюдаемому в эксперименте $\Delta t \sim 2.5$ мс для серии вспышек ГАМ с меняющейся частотой и $\Delta t \sim 30$ мс для сценария с длительной эволюцией ГАМ. С помощью моделирования показано, что в сценарии с изменяющейся частотой ГАМ именно спад частоты способствует инициированию L-H перехода вспышками ГАМ.

В **параграфе 2.5** представлены результаты моделирования экспериментальных сценариев с ГАМ в токамаке ФТ-2 с относительно низкой среднехордовой концентрацией $n < 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В таких разрядах L-H переход в этом токамаке не происходит. Подробно описано определение из экспериментальных данных различных параметров ГАМ (частота, длина волны, локализация), использованных в расчётах. Результаты расчётов показывают, что вспышка ГАМ в токамаке ФТ-2 не может привести к L-H переходу, причём моделирование показывает также, что ГАМ даже существенно большей амплитуды и длительности в характерных режимах ФТ-2 не инициирует переход в H-моду.

На основании результатов, полученных в параграфах 2.3-2.5, проведён анализ возможности перехода в режим улучшенного удержания в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2 в режимах с ГАМ. Результаты анализа изложены в **параграфе 2.6**. Построенные нелинейные зависимости потока частиц от градиента концентрации (в радиальной области, соответствующей наиболее сильному возмущению градиента) показывают, что величина интегрального источника частиц в токамаке ТУМАН-3М предполагает существование двух стационарных решений уравнения диффузии, т.е. двух режимов удержания, переключение между которыми осуществляется при наличии сильного возмущения шири E_r , вызванного ГАМ. В токамаке ФТ-2 в разрядах с ГАМ интегральный

источник достаточно мал и предполагает существование только стационарной L-моды, H-мода оказывается недоступной даже при очень сильном возмущении электрического поля.

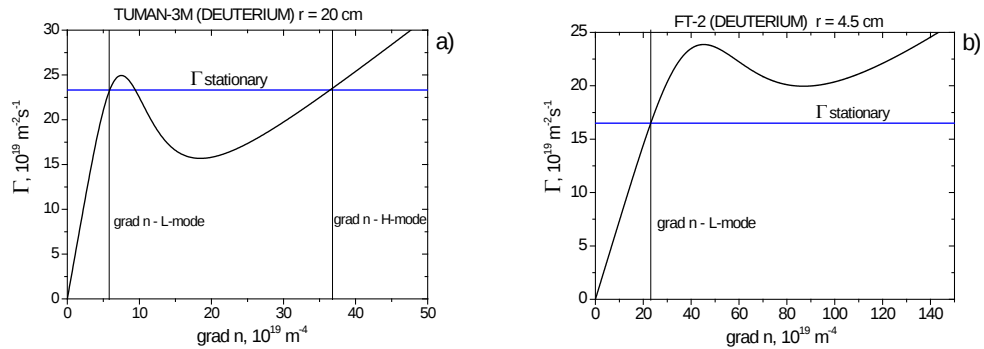


Рис. 2. Зависимость потока частиц от градиента концентрации для разрядов с ГАМ в токамаках ТУМАН-3М (а) и ФТ-2 (б). В сценариях разрядов с ГАМ в токамаке ТУМАН-3М величина источника предполагает два стационарных состояния, L- и H-моду, с возможностью бифуркации удержания. В ФТ-2 для обоих изотопов возможна только стационарная L-мода [A9].

На основании этого анализа сформулировано предположение о возможности инициирования L-H перехода в токамаке ФТ-2 при увеличении источника частиц. Такой сценарий реализуется в токамаке ФТ-2 в разрядах с существенно увеличенной концентрацией (примерно в 3-4 раза, до $n \sim 9 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) [9, A1, A8], и будет более подробно описан в **главе 4**. В **параграфе 2.8** сформулированы выводы данной главы: с помощью моделирования экспериментальных сценариев и анализа режимов удержания показано, что в сценариях с ГАМ возможность перехода в H-моду определяется как свойствами ГАМ (т.е. возмущением шири E_r), так и величиной источника частиц и свойствами турбулентности.

Третья глава диссертации посвящена экспериментам по инжекции замороженной топливной пеллеты в плазму токамака ТУМАН-3М [A2, A3, A6, A7, A10, A13, A14].

В **параграфе 3.1** описан установленный в настоящее время инжектор, использованный при проведении экспериментов, описана геометрия и основные характеристики инжекции (размеры и скорость пеллет, способы наблюдения испарения пеллеты) [A13]. Приводится характерный вид временных зависимостей параметров плазмы для двух основных наблюдаемых сценариев инжекции: когда твёрдая пеллета влетает в плазму как целый объект, и когда пеллета частично разрушается и испаряется в пеллетопроводе и влетает в плазму в виде облака газа и осколков материала пеллеты. Такие сценарии характеризуются различными наблюдаемыми кривыми испарения, и приводят к разным последствиям.

Параграф 3.2 посвящён экспериментам на токамаке ТУМАН-3М, в которых инжекция пеллеты инициировала переход в режим улучшенного удержания. Наблюдались два основных сценария улучшения удержания: первый – переход в самоподдерживающуюся Н-моду при периферийном ($r/a = 0.85$) испарении твёрдой пеллеты совместно с облаком газа от разрушенной части пеллеты (также наблюдался при инжекции только облака газа, т.е. полностью разрушенной пеллеты); второй – кратковременное (в течение нескольких мс) улучшение удержания с последующим обратным переходом в L-моду при инжекции твёрдой пеллеты в более глубокие области плазмы без сопровождающего облака газа ($r/a = 0.7$). Пример инициирования L-H перехода пеллетой приведён на рис. 3, кратковременного улучшения удержания – на рис. 4.

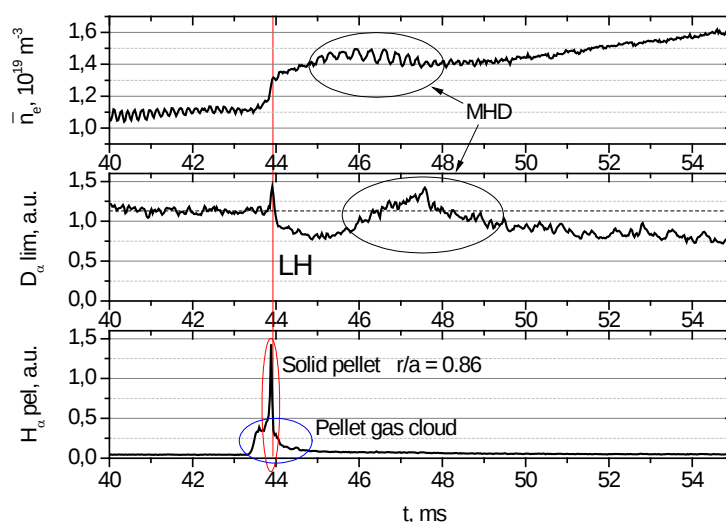


Рис. 3. L-H переход, инициированный пеллет-инжекцией в ТУМАН-3М. Сверху вниз приведены концентрация плазмы, свечение линии D_α на лимитере и свечение линии H_α из области испарения пеллеты. Видна сложная кривая испарения: пик от твёрдого осколка и пологая кривая от сопутствующего газа. Н-мода, характеризующаяся ростом концентрации и спадом линии свечения D_α на периферии, продолжает существовать после испарения пеллеты [A6].

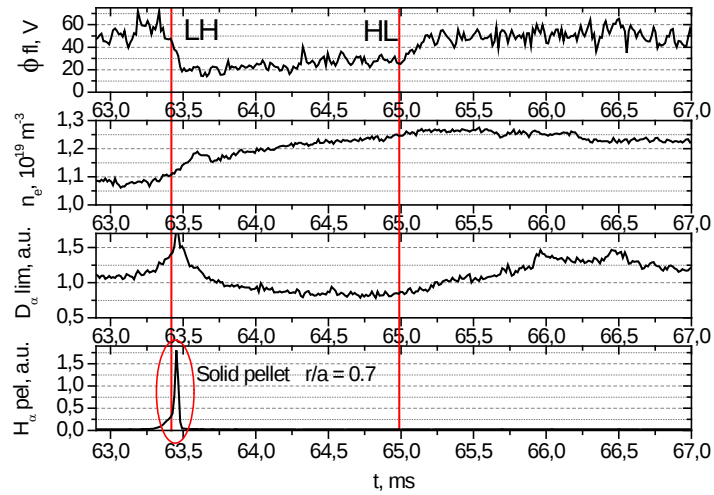


Рис. 4. Временное улучшение удержания при инжекции пеллеты в ТУМАН-3М в результате инжекции твёрдой пеллеты без облака газа и снега от разрушенной части пеллеты. Сверху вниз приведены плавающий потенциал на периферии, концентрация плазмы, свечение линии D_α на лимитере и свечение линии H_α из области испарения пеллеты. L-H и H-L-переходы отмечены вертикальными линиями. Состояние непосредственно после испарения пеллеты обладает характеристиками H-моды (спад свечения периферийной D_α и плавающего потенциала, рост концентрации), однако обратный переход спонтанно происходит через примерно 1.5 мс [A6].

В параграфе 3.3 описаны особенности применения транспортной модели для расчёта эволюции профилей концентрации и ионной температуры в разрядах с пеллет-инжекцией в токамаке ТУМАН-3М. Так как испарение пеллеты приводит не только к локальному увеличению концентрации, но и к локальному охлаждению ионной компоненты, в модели для сценариев с пеллет-инжекцией используются уравнения диффузии и ионного теплопереноса (с неоклассическим коэффициентом температуропроводности). Зависимость коэффициента диффузии от ширины E_T была использована в том же виде, что и для сценариев с ГАМ. Возмущение источника частиц и тепла, связанное с испарением пеллеты, рассчитывалось на основе экспериментального наблюдения кривой испарения пеллеты. Эволюция среднехордовой концентрации, вычисленная по центральной хорде, при испарении пеллеты сравнивалась с сигналом интерферометра также на центральной хорде. Это сравнение также является необходимой проверкой для нормировки возмущения источника.

Параграф 3.4 посвящён описанию результатов моделирования двух основных сценариев с улучшением удержания при пеллет-инжекции (рис. 5).

В первом сценарии (инициирование самоподдерживающегося L-H перехода) вид экспериментальной кривой испарения пеллеты указывает на наличие облака газа от разрушенной части пеллеты перед влётом твёрдого осколка. Возмущение источника частиц, состоящее из плавного роста (облако газа) и локального резкого увеличения (твёрдый осколок) было заложено в модель. Результаты моделирования показывают, что подобное возмущение приводит к инициированию L-H перехода. Интересной особенностью данного сценария является то, что если в модели оставить только возмущение источника частиц, связанное с твёрдой частью пеллеты (без облака газа), самоподдерживающегося L-H перехода не происходит: вероятно, исходный источник частиц в данном сценарии предполагает только одно стационарное состояние – L-моду, в соответствии с подходом, изложенным в параграфе 1.2. Данное наблюдение проверено ниже (см. параграф 3.5) в рамках анализа нелинейной зависимости потока частиц от градиента концентрации для этого сценария.

Во втором сценарии происходит только кратковременное улучшение удержания, система возвращается в исходное состояние примерно в течение 1 мс после инъекции пеллеты. Область с подавленной аномальной диффузией существует только во время испарения пеллеты.

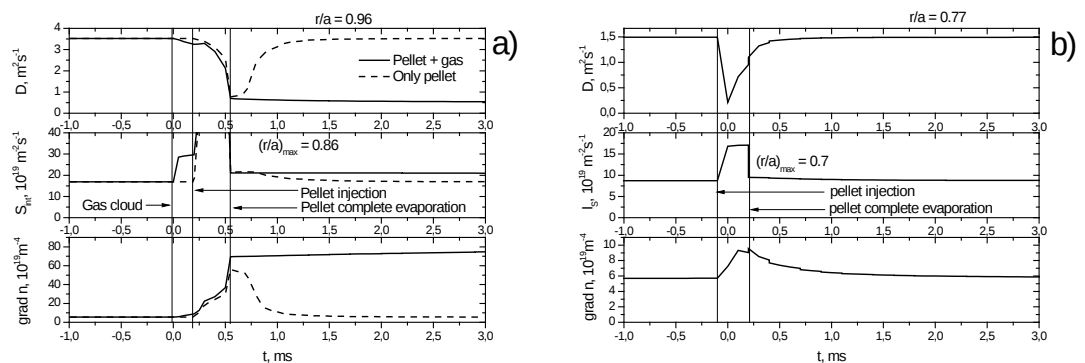


Рис. 5. Результаты моделирования для разрядов с пеллет-инжекцией: L-H переход (a) и кратковременное улучшение удержания (b). На рисунке представлена временная эволюция коэффициента диффузии, интегрального источника частиц и периферийного градиента концентрации. На рис. 5 (a) показана эволюция для экспериментального сценария с пеллетой и облаком газа (сплошные линии) и гипотетического случая аналогичной пеллеты без облака газа (пунктирные линии) [A6].

Результаты хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями, однако во втором сценарии эволюция среднехордовой концентрации в модели и в эксперименте различна. В модели длительность фазы улучшенного удержания существенно короче – диффузия

подавлена в течение 0.5 мс, в то время как в эксперименте Н-мода наблюдается в течение 1.5 мс. Наиболее вероятной причиной расхождения, согласно результатам gyrokinetic моделирования для данного сценария [A7], является существенное увеличение столкновительности из-за увеличения концентрации и уменьшения температуры при испарении пеллеты. Плазма переходит в режим Пфирш-Шлютеровской столкновительности, при этом TEM мода турбулентности перестаёт раскачиваться в течение времени термализации ионов, коэффициенты переноса в течение этого времени падают до неоклассических значений. Включение в модель зависимости инкремента нарастания турбулентности от параметров плазмы – одно из направлений дальнейшего ее совершенствования.

В параграфе 3.5 представлены результаты анализа возможности перехода в режим улучшенного удержания для сценариев с пеллет-инжекцией (рис. 6).

Сравнение нелинейной зависимости потока частиц от градиента концентрации и с уровнем интегрального источника частиц для сценария с L-Н переходом (рис. 6а) показывает, что изначальный источник частиц в данном разряде оказывается недостаточным для того, чтобы могли существовать два стационарных решения уравнения диффузии, т.е. два режима удержания – L- и Н-мода. Облако газа от разрушенной части пеллеты является дополнительным источником частиц, который обеспечивает возможность существования стационарной Н-моды. Этим объясняется результат моделирования в гипотетическом аналогичном сценарии с твёрдым осколком пеллеты (без сопутствующего газового облака испаренного материала), при испарении которого L-Н переход не происходит.

В случае с более глубоким испарением пеллеты, влетающей в плазму в виде одного твёрдого фрагмента (рис. 6б), величина интегрального источника частиц предполагает существование только одного стационарного режима – L-моды, что согласуется с результатами моделирования и экспериментальными наблюдениями.

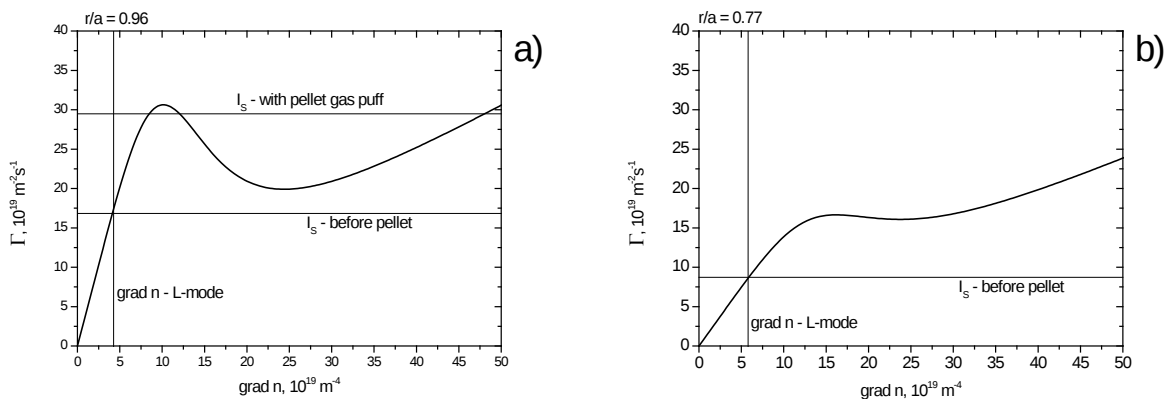


Рис. 6. Зависимости потока частиц от градиента концентрации для разрядов с пеллет-инжекцией в токамаке ТУМАН-3М с L-H переходом (а) и кратковременным улучшением удержания (б). В сценарии с L-H переходом дополнительный источник от облака газа обеспечивает возможность существования двух устойчивых состояний. В сценарии с кратковременным улучшением удержания из-за малой величины источника возможна только L-мода [A6].

Параграф 3.6 содержит выводы к третьей главе: на основе численного моделирования и анализа экспериментальных сценариев с пеллет-инжекцией в токамаке ТУМАН-3М, демонстрирующих различную динамику улучшения удержания, можно заключить, что возможность L-H перехода зависит от сочетания параметров диффузии и стационарной величины источника частиц, т.е. существует порог по источнику частиц для L-H перехода.

Глава 4 посвящена определению роли источника как фактора, ответственного за инициирование L-H перехода в отсутствие возмущения радиального электрического поля, что соответствует экспериментальным сценариям с омическим L-H переходом в токамаке ТУМАН-3М или с улучшением удержания в режимах с высокой концентрацией в токамаке ФТ-2 [A1-A3, A6, A8].

В параграфе 4.1 продемонстрирована возможность применения используемой модели переключения режима удержания к сценарию с инициированием L-H перехода увеличением газонапуска. При этом, согласно данной модели, L-H переход должен произойти, когда интегральный источник достигнет величины, при которой существует только одно пересечение с нелинейной зависимостью потока частиц от градиента концентрации, соответствующее подавленному аномальному переносу. Сценарий, моделируемый в этом параграфе, аналогичен по своим параметрам сценарию, в котором инъекция пеллеты, попавшей в плазму в состоянии облака газа, приводила к L-H переходу. Расчёты согласуются с теоретическими представлениями – при уровне источника, соответствующем одному пересечению с верхним линейным участком кривой $\Gamma(\partial n / \partial r)$, происходит переход в самоподдерживающуюся H-моду (уменьшение диффузии и рост градиента концентрации), см. рис. 7. Этот результат качественно согласуется наблюдениями L-H перехода, инициированного облаком газа при пеллет-инъекции. Также данный результат согласуется с наблюдениями омического L-H перехода в токамаке ТУМАН-3М, инициируемого импульсом газонапуска, и наблюдениями улучшения удержания в дейтериевых разрядах в токамаке ФТ-2 при существенно увеличенной концентрации.

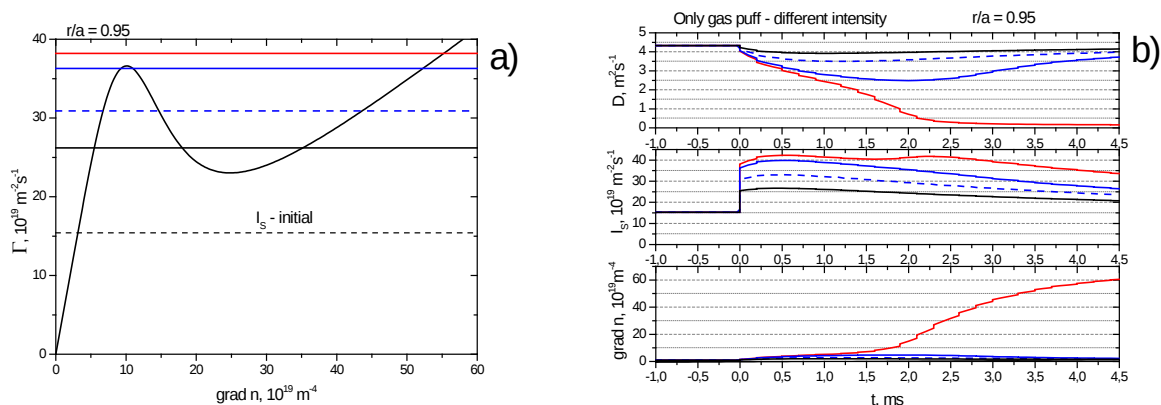


Рис. 7. Зависимость $\Gamma(\partial n/\partial r)$ для разряда в ТУМАН-3М с увеличенным газонапуском без прямого возмущения E_r (а) и результаты моделирования для такого разряда (б). На графике (б) изображена эволюция коэффициента диффузии, интегрального источника и градиента концентрации; цвета линий соответствуют уровням интегрального источника. В случае если интегральный источник лежит выше области трёх пересечений, происходит плавный переход в H-моду [A6].

В токамаке ФТ-2 дейтериевых разрядах наблюдается увеличение времени удержания энергии и частиц по сравнению с режимом линейного омического удержания (плавное, без ярко выраженного перехода), профиль концентрации приобретает характерную для режима улучшенного удержания форму с сильным градиентом на периферии. В водородных же разрядах улучшение удержания не наблюдается. Анализ нелинейной зависимости потока частиц от градиента концентрации [A1, A8], результаты которого представлены в **параграфе 4.2**, показал, что для обоих изотопов в разрядах с высокой концентрацией в токамаке ФТ-2 увеличенный источник частиц определяет существование только одного стационарного режима с улучшенным удержанием. В водороде при этом инкремент нарастания турбулентности оказывается весьма значительным и сравнимым по величине с широм E_r , что приводит к тому, что диффузия очень незначительно подавляется таким электрическим полем.

В **параграфе 4.3** содержатся выводы данной главы. На основании моделирования и анализа экспериментальных сценариев показано, что увеличение источника частиц может инициировать L-H переход без существенного возмущения радиального электрического поля; существование порога по источнику частиц (или концентрации), наблюдаемое в экспериментах, объяснимо в рамках используемого в работе подхода, описывающего улучшение удержания бифуркацией в уравнениях переноса с нелинейными коэффициентами переноса.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы:

1. Проведены эксперименты по инициированию L-H перехода инжектируемой замороженной водородной или дейтериевой пеллетой. Определены предпочтительные условия инъекции для инициирования L-H перехода (периферийное испарение, совместный влёт в плазму твёрдого осколка пеллеты и облака газа от разрушенной части пеллеты). Обнаружены различные сценарии улучшения удержания – классический L-H переход и временное улучшение удержания с обратным HL-переходом.

2. Разработана численная модель, позволяющая самосогласованно рассчитать эволюцию профилей концентрации и ионной температуры с учётом коэффициента диффузии, зависящего от шири радиального электрического поля. Для рассмотренных сценариев на основании данных, полученных из модели и эксперимента, построены нелинейные зависимости потока частиц от градиента концентрации, на основании вида которых можно определить возможность существования различных режимов удержания.

3. Для основных экспериментальных сценариев с улучшением удержания при пеллет-инъекции построена модель эволюции профилей концентрации и ионной температуры. С помощью моделирования показано, что инициирование L-H перехода возможно в случае периферийного испарения пеллеты, создающего сильный шир E_r в области формирования транспортного барьера H-моды. Также показано, что величина источника определяет возможность инициирования L-H перехода – в стандартных режимах с пеллет-инжекцией требовался дополнительный источник частиц, создаваемый облаком газа от испарившейся в пеллетопроводе части пеллеты.

4. Модель применена к сценариям с колебаниями геодезической акустической моды в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2. Для токамака ТУМАН-3М определены пороговые значения параметров ГАМ, необходимых для инициирования перехода в режим улучшенного удержания. Значения амплитуды ГАМ, необходимые для инициирования перехода в H-моду, оказываются близки к экспериментальным величинам. Показана возможность инициирования перехода в режим улучшенного удержания серий всплесков ГАМ за счёт накопления шири среднего E_r . Для токамака ФТ-2 в режимах с низкой концентрацией плазмы с помощью модели показана невозможность инициирования L-H перехода всплеском ГАМ, что подтверждается экспериментом. С помощью моделирования показано, что величина источника частиц является фактором, определяющим наличие и отсутствие перехода в режим улучшенного удержания в режимах с низкой концентрацией в токамаках ТУМАН-3М и ФТ-2 соответственно.

5. Модель применена к сценариям с высокой концентрацией в ФТ-2, допускающим существование режима улучшенного удержания. С помощью моделирования показано, что в данных сценариях величина источника оказывается достаточной для существования режима улучшенного удержания. Модификация профиля с образованием транспортного барьера возможна только в случае, если шир среднего E_r существенно превосходит уровень инкремента нарастания турбулентности; в противном случае профиль в режиме улучшенного удержания мало отличается от профиля в режиме обычного омического удержания.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования предполагают обобщение модели инициирования L-H перехода. Во-первых, актуально обобщение на геометрию D-образных и сферических токамаков, каковыми являются все крупнейшие установки. Во-вторых, представляется немаловажным сделать модель самосогласованной, добавив расчёт эволюции турбулентности, раскачка и затухание которой будет зависеть от параметров плазмы и шира радиального электрического поля; в свою очередь, коэффициенты переноса также будут определяться уровнем турбулентности. Это приблизит модель к более сложным и точно описывающим поведение плазмы моделям типа «хищник-жертва», где учитывается взаимное влияние шира вращения плазмы (определяемое как неоклассическим E_r , так и осциллирующим E_r зональных потоков и ГАМ) и уровня турбулентности.

Список основных публикаций по теме диссертации, из них 11 индексируются в базе Web of Science

A1. D.V. Kouprienko, A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov, A.B. Altukhov, L.G. Askinazi, **A.A. Belokurov**, V.V. Dyachenko, L.A. Esipov, V.A. Ivanov, O.A. Kaledina, S.I. Lashkul, S.V. Shatalin, A.V. Sidorov, N.V. Tropin and S. Janhunen. Isotope effect in turbulent transport in high density FT-2 tokamak discharges // Nucl. Fusion 2022 62 066045

A2. **Alexander Belokurov**, Gulnara Abdullina, Leonid G Askinazi, Viktor Bulanin, Laurent Chôné, Alexey Dmitrievich Gurchenko, Evgeniy Z Gusakov, Timo P Kiviniemi, Vladimir A Kornev, Sergei V Krikunov, Denis V Kouprienko, Sergey Lashkul, Sergei V Lebedev, Susan Leerink, Paavo Niskala, Alexander Petrov, Dmitriy Razumenko, A S Tukachinsky, Alexander Yashin and N A Zhubr. Particle source and radial electric field shear as the factors affecting the L-H transition possibility and dynamics in a tokamak // Phys. Scr. 2020 95 115604

A3. G. Abdullina, L. Askinazi, **A. Belokurov**, V. Bulanin, L. Chôné, A. Gurchenko, E. Gusakov, T. Kiviniemi, V. Kornev, S. Krikunov, D. Kouprienko, S.Lashkul, S. Lebedev, S. Leerink, P. Niskala, A. Petrov, A. Tukachinsky, A. Yashin, N. Zhubr. L-H transition initiation and dynamics in a conventional tokamak // AIP Conference Proceedings 2019 2179 020002

A4. **Белокуров А.А.**, Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Буланин В.В., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Лебедев С.В., Петров А.В., Разуменко Д.В., Тукачинский А.С., Яшин А.Ю. Влияние временных характеристик колебаний геодезической акустической моды на возможность инициирования L-H перехода в токамаке ТУМАН-3М. // Письма ЖТФ 2019 т.45 15 43

A5. N.N. Bakharev, G.I. Abdullina, V.I. Afanasyev, A.B. Altukhov, L.G. Askinazi, N.A. Babinov, A.N. Bazhenov, **A.A. Belokurov** et al. Tokamak research at the Ioffe Institute. // Nucl. Fusion 2019 59 112022

A6. **A.A. Belokurov**, L.G. Askinazi, L. Chôné, E.Z. Gusakov, T.P. Kiviniemi, V.A. Kornev, T. Korpilo, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, S. Leerink, P. Niskala, R. Rochford, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinsky and N.A. Zhubr. Dynamics of the L-H transition in TUMAN-3M tokamak in the scenarios with cryogenic pellet injection // Nucl. Fusion 2018 58 112007

A7. T P Kiviniemi, P Niskala, L G Askinazi, **A A Belokurov**, L Chôné, A D Gurchenko, E Z Gusakov, T Korpilo, S V Lebedev, S Leerink, R Rochford and A S Tukachinsky. Gyrokinetic simulation of transport reduction by pellet injection in TUMAN-3M tokamak. // Plasma Phys. Control. Fusion 2018 60 085010

A8. D. Kouprienko, A. Altukhov, L. Askinazi, **A. Belokurov**, L. Esipov, A.D. Gurchenko, E. Gusakov, S. Lashkul, S. Leerink, P. Niskala, S. Shatalin, G. Troshin. Isotope effect in confinement in high density FT-2 tokamak regimes. // Proc. 45th EPS Conf. on Plasma 2018 vol 42A P4.1097

A9. L G Askinazi, **A A Belokurov**, V V Bulanin, A D Gurchenko, E Z Gusakov, T P Kiviniemi, S V Lebedev, V A Kornev, T Korpilo, S V Krikunov, S Leerink, M Machielsen, P Niskala, A V Petrov, A S Tukachinsky, A Yu Yashin and N A Zhubr. Physics of GAM-initiated L-H transition in a tokamak. // Plasma Phys. Control. Fusion 2017 v.59 1 014037

A10 **Belokurov A.A.**, Askinazi L.G., Bulanin V.V., Chôné L., Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Kiviniemi T.P., Kornev V.A., Korpilo T., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Leerink S., Niskala P., Petrov A.V., Rochford R., Tukachinsky A.S., Yashin A.Yu., Zhubr N.A. L-H transition dynamics in the presence of GAM and pellet-injection. // Proc. 44th EPS Conf. on Plasma Physics 2017 vol 41F P1.172

A11. V V Bulanin, L G Askinazi, **A A Belokurov**, V A Kornev, V Lebedev, A V Petrov, A S Tukachinsky, M I Vildjunas, F Wagner and A Yu Yashin. GAM observation in the TUMAN-3M tokamak // Plasma Phys. Control. Fusion 2016 v.58 4 045006

A12. T.P. Kiviniemi, L.G. Askinazi, **A.A. Belokurov**, A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov, T. Korpilo, M.Machielsen, S. Leerink, P. Niskala, R. Rochford. Gyrokinetic simulation of interplay between GAM and transport in TUMAN-3M tokamak // Proc. 43 EPS Conf. on Plasma Physics 2016 vol 40A P2.059

A13. **A.A. Belokurov**, L.G. Askinazi, V.A.Kornev, S.V. Lebedev, A.I. Smirnov, A.S.Tukachinsky, N.A. Zhubr. Hydrogen pellet initiated H-mode in TUMAN-3M tokamak // Proc. 42nd EPS Conf. on Plasma Physics 2015 vol 39E P5.163

A14. L.G. Askinazi, V.I. Afanasyev, A.B. Altukhov, N.N. Bakharev, **A.A. Belokurov** et al. Fusion Research in Ioffe Institute // Nucl. Fusion 2015 55 104013

A15. Аскинази Л.Г., **Белокуров А.А.** Возможность инициирования перехода плазмы в режим улучшенного удержания вспышкой колебаний геодезической акустической моды в токамаке ТУМАН-3М // Письма ЖТФ 2015 т.41 22 25

A16. L.G. Askinazi, **A.A. Belokurov**. GAM evolution and L-H transition in TUMAN-3M tokamak // Proc. 41st EPS Conf. on Plasma Physics 2014 vol 38F P4.060

Список цитируемой литературы:

1. Wagner F et al // Phys. Rev. Lett. 1982 49 1408
2. Wagner F et al // Plasma Phys. Control. Fusion 2007 49 B1
3. Biglari H., Diamond P.H. and Terry P.W. // Phys. Fluids B 1990 2 1
4. Burrell K H // Physics of Plasmas 1999 6 4418

5. Lebedev S.V., Askinazi L.G., Chernyshev F.V. et al // Nucl. Fusion 2009 49 085029
6. Loarte A. et al ITER Physics Basis Ch. 4 // Nucl. Fusion 2007 47 S203
7. Hinton F L and Staebler G M // Physics of Fluids B 1993 5 1281
8. Malkov M.A. and Diamond P.H. // Phys. Plasmas 2008 15 122301
9. Куприенко Д.В. и др. // Физика Плазмы 2019 45 12 1103