

АСКИНАЗИ Леонид Георгиевич
**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
НА УДЕРЖАНИЕ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ**
(специальность 01.04.08 - физика плазмы)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

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

Научный консультант:

- доктор физ.-мат. наук **С.В.Лебедев**
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (Санкт-Петербург)

Официальные оппоненты:

- доктор физ.-мат. наук, профессор **В.А. Курнаев**
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва), профессор

- доктор физ.-мат. наук, профессор **В.Ю. Сергеев**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский политехнический университет (Санкт-Петербург), профессор

- доктор физ.-мат. наук, доцент **А.В. Мельников**
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва), вед. н. с.

Ведущая организация: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (Москва)*

Защита состоится 26 декабря 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе

Автореферат разослан <25> ноября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.205.03,

кандидат физ.-мат. наук

А.М. Красильщиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

На примере токамака ТУМАН-3М [1] экспериментально исследована взаимосвязь электрических полей и режима удержания плазмы в токамаках. Исследованы различные экспериментальные сценарии с переходами между L -модой (от *Low Confinement Mode*) и H -модой (от *High Confinement Mode*) – т.н. LH - и HL -переходами, как инициированными различными воздействиями на плазму, так и спонтанными. H -мода характеризуется увеличенным, примерно вдвое, по сравнению с L -модой, временем удержания энергии и вещества. Эта особенность данного режима обуславливает важность его исследования, с точки зрения осуществления управляемого термоядерного синтеза (УТС) в системах с магнитным удержанием плазмы. В качестве инструмента для измерения величины радиального электрического поля использованы такие диагностические методики, как НІВР-диагностика [2] (*Heavy Ion Beam Probe*, диагностический пучок тяжелых ионов), применявшийся для измерения прямого невозмущающего измерения потенциала плазмы, и электростатические зонды [3], с помощью которых измерялось радиальное электрическое поле на границе плазмы. Дополнительная информация о характеристиках радиального электрического поля получалась с помощью других диагностик, таких как оптическая доплеровская спектроскопия, применявшаяся для оценки скорости вращения примесей, и СВЧ доплеровская рефлектометрия [4] дававшая информацию о скорости полоидального вращения флуктуаций электронной плотности. В ходе работы установлены основные факторы, определяющие поведение радиального электрического поля и радиального тока и их влияние на режим удержания плазмы в токамаке ТУМАН-3М.

Актуальность темы диссертации. Исследование режимов улучшенного удержания плазмы и методов управления ими является одной из важнейших задач современной физики высокотемпературной плазмы тороидальных установок. Следует отметить, что режим улучшенного удержания плазмы (H -мода) необходим для успешной работы сооружаемого в настоящее время международного экспериментального токамака-реактора ИТЭР. Отсутствие этого режима (L -мода) потребовало бы для достижения условий зажигания термоядерной реакции значительно больших размеров установки и мощности нагрева плазмы. С другой стороны, слишком хорошее удержание частиц в плазме термоядерной установки ведет к накоплению примесей, что обуславливает интерес также и к поиску способов контролируемого отключения H -моды. Таким образом, исследование механизмов инициирования LH - и HL -переходов представляется актуальным с практической точки зрения. Кроме того, понимание процессов, ответственных за переключение режима

удержания плазмы в токамаке, представляет интерес и с точки зрения фундаментальной науки, поскольку способствует пониманию процессов, ответственных за взаимодействие электрических полей, профиля скорости вращения и уровня аномального переноса в плазме.

Исследования H -моды и механизма улучшения удержания при LH -переходе ведутся на многих тороидальных плазменных установках - токамаках и стеллараторах. Кроме того, в последние годы достигнут значительный прогресс и в теоретическом описании физики этих явлений [5]. В настоящее время общепринятой считается модель развития LH -перехода в результате подавления аномального переноса пространственно-неоднородным вращением плазмы, вызванном $E \times B$ дрейфом в неоднородном радиальном электрическом поле. Механизмы генерации радиального электрического поля, необходимого для инициирования LH - или HL -перехода, могут быть разными в зависимости от конкретного сценария эксперимента. Поиск общих закономерностей генерации радиального электрического поля и переключения режима удержания при различных воздействиях на плазму токамака является актуальной научной проблемой.

Исследованию процесса переключения удержания плазмы в тороидальных системах, и в том числе – роли радиального электрического поля, посвящено большое количество статей в научных журналах – как оригинальных, так и обзорных.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований физики H -моды и процессов, ответственных за переключение режима удержания в тороидальных установках, регулярно докладываются на крупных международных конференциях, таких как Конференция МАГАТЭ по энергии ядерного синтеза (IAEA Fusion Energy Conference), Конференция европейского физического общества по физике плазмы (EPS Conference on Plasma Physics), Международный конгресс по физике плазмы (International Congress on Plasma Physics), Международная Конференция в г. Токи (Япония) по физике плазмы (International Toki Conference), и Международная Школа-конференция в Алуште (Alushta International Conference-School), Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС), недавно получившая статус международной. Кроме того, регулярно проводятся более специализированные мероприятия, такие как Совещание по физике H -моды и транспортных барьеров (Workshop on H -mode Physics and Transport Barriers), присоединенное к Конференции ЕФО, Совещание по электрическим полям в плазме (EPS satellite meeting on Radial Electric Field) и другие.

В подавляющем большинстве работ, посвященных переключению удержания, исследуется какой-либо один конкретный сценарий инициирования перехода — например, при включении того или иного источника дополнительного нагрева, или при поляризации периферийной плазмы. При этом общие закономерности этих процессов часто остаются в

тени. Поэтому представляется актуальным исследовать возможность инициирования *LH*- и *HL*-переходов в различных экспериментальных условиях на одной установке, и выявить универсальные физические механизмы и закономерности, проявляющиеся при этом.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является выявление общих закономерностей поведения радиального электрического поля, проявляющихся в различных экспериментальных сценариях *LH*- и *HL*-переходов, и построение модели переключения режимов удержания в токамаке под воздействием возмущения радиального электрического поля.

С этой целью решались следующие основные задачи:

- Усовершенствование диагностического комплекса токамака ТУМАН-3М для обеспечения возможности измерения потенциала плазмы и радиального электрического поля в разных режимах;
- Исследование *LH*- и *HL*-переходов при динамическом воздействии на плазменный шнур – быстром магнитном сжатии/расширении и подъеме/сбросе плазменного тока с целью выяснения механизма, ответственного за переключение удержания;
- Измерение потенциала и радиального электрического поля при возникновении в плазме МГД-возмущения типа вращающегося магнитного острова, и выяснение его роли при развитии *HL*-перехода в этом режиме;
- Исследование осциллирующей компоненты возмущения потенциала и радиального электрического поля при возникновении в плазме колебаний геодезической акустической моды (GAM, *Geodesic Acoustic Mode*), и выяснение роли этих колебаний в инициировании *LH*-перехода;
- Исследование механизма *LH*-перехода при низкой плотности плазмы при инъекции нагревного атомарного пучка навстречу плазменному току (counter-NBI), определение роли радиального электрического поля и потенциала плазмы в этом режиме.

Научная новизна данной работы заключается в исследовании большого количества разнообразных экспериментальных сценариев *LH*- и *HL*-переходов в токамаке, и анализе результатов этих экспериментов в рамках общей концепции подавления аномального переноса неоднородным вращением плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. В результате выполнения работы

- Впервые продемонстрирована возможность инициирования *LH*-перехода в результате быстрого магнитного сжатия плазмы или подъема плазменного тока, а также *HL*-перехода – при быстрой магнитной декомпрессии плазмы или сбросе плазменного тока;

- Показано, что переключение удержания в этих режимах является результатом генерации радиального электрического поля того или иного знака (в зависимости от вида воздействия на плазму), вызванной возмущением электронного дрейфа Уэйра;

- Впервые экспериментально обнаружена генерация положительного радиального электрического поля под воздействием вращающегося магнитного острова. Показано, что данное поле не локализовано на границе плазменного шнура, но затрагивает и центральные области плазмы. С привлечением данного механизма, объяснено наблюдаемое в эксперименте инициирование *HL*-перехода в результате вспышки МГД-активности;

- Экспериментально продемонстрирована возможность инициирования *LH*-перехода в плазме аномально низкой плотности при инжекции атомарного нагревного пучка навстречу току плазмы. Впервые показано, что инициирование *LH*-перехода в таком сценарии не связано с нагревом плазмы или столкновительной передачей ей импульса от атомарного пучка, но может быть объяснено генерацией отрицательного радиального электрического поля в результате потерь быстрых ионов.

- Впервые в ходе численного моделирования продемонстрирована возможность инициирования *LH*-перехода вспышкой GAM.

Практическая значимость работы заключается в разработке принципов и экспериментальных методов инициирования *LH*- и *HL*-переходов в токамаке, что представляется важным с точки зрения осуществления управления удержанием в токамаке-реакторе, а также в выявлении роли радиального электрического поля в процессах переключения режима удержания, что будет способствовать оптимизации сценариев работы существующих и сооружаемых тороидальных термоядерных установок.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Установление универсальной роли радиальных полей и токов в инициировании *LH*- и *HL*-переходов в токамаке.

2. Выяснение механизма генерации радиального электрического поля и переключения режима удержания под воздействием возмущения тороидального электрического поля при динамическом воздействии на профиль тока в токамаке: магнитном сжатии/декомпрессии и подъеме/сбросе тока по плазме.

3. Обнаружение с помощью НВР-диагностики генерации положительного радиального электрического поля величиной до 5.5 кВ/м при развитии в плазме токамака МГД-неустойчивости, приводящей к образованию вращающегося магнитного острова, и идентификация механизма отключения режима улучшенного удержания плазмы этим полем.

4. Выяснение особенностей механизма инициирования *LH*-перехода при инжекции нагретого атомарного пучка в направлении навстречу плазменному току. Определение механизма генерации радиального электрического поля и тороидального вращения в этом сценарии в результате возникновения радиального тока, переносимого неустойчивыми быстрыми ионами. Снижение порога по плотности для *LH*-перехода до с $1.25 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до $0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

5. Наблюдение колебаний на частоте геодезической акустической моды на потенциале в центральной части плазмы токамака и корреляции ее эволюции с переключением режима удержания. Модель инициирования *LH*-перехода при развитии этой моды.

Апробация работы и публикации. Результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на семинарах лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе, на конкурсах ФТИ на лучшую научную работу (Премия ФТИ за 1999 и 2001 гг., Премия Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики за 2007 г.), совместных семинарах ФТИ им. А.Ф. Иоффе – Culham Laboratory и ФТИ им. А.Ф. Иоффе – Helsinki University of Technology, а также на всероссийских и международных совещаниях и конференциях:

- Звенигородская (Международная) конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород-1998...2011гг.);
- EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (Amsterdam-1990, Berlin-1991, Lisboa-1993, Montpellier-1994, Bournemouth-1995, Berchtesgaden-1997, Praha-1998, Maastricht-1999, Budapest-2000, Madeira-2001, Montreux-2002, St.Petersburg-2003, London-2004, Tarragona-2005, Rome-2006, Warsaw-2007, Hersonissos-2008, Dublin-2010, Strasbourg-2011, Stockholm-2012);
- American Physical Society Division of Plasma Physics Annual Meeting (APS DPP Seattle-1992, Long Beach-2001, Savannah-2004)
- IAEA Fusion Energy Conference (Yokohama-1998, Sorrento-2000, Lyon-2002, Vilamora-2004, Chengdu-2006, Geneva-2008, Daejeon-2010, San Diego-2012);
- International Congress on Plasma Physics (Sydney-2002, Kiev-2006);
- Technical Meeting/Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (WS on H-mode and TB TB: St. Petersburg-2005, Tsukuba-2007, Princeton-2009, Oxford-2011, Fukuoka-2013)
- IAEA Technical Committee Meeting on Research Using Small Tokamaks (IAEA TCM RUST San Paulo-1993, Chengdu-1999, Vienna-2008);
- International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Alushta-2004, 2006, 2012);

По результатам работы автором опубликовано 42 научных работы, из них 20 – в рецензируемых журналах и 22 – в сборниках трудов конференций.

Личный вклад автора. Все новые научные результаты получены с определяющим участием автора. Автор принимал непосредственное участие в разработке сценариев, осуществлении экспериментов на токамаке ТУМАН-3М и анализе их результатов. Измерения потенциала плазмы и радиального электрического поля с помощью НВР-диагностики и электростатических зондов во всех экспериментах выполнены лично автором работы. Под руководством автора выполнено моделирование инициирования *LH*-перехода вспышкой GAM. Автор принимал непосредственное участие в анализе данных других диагностик, несущих информацию об удержании плазмы и эволюции электрического поля.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из пяти глав, введения и заключения. Общий объем диссертация 235 страниц, включая 68 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснованы актуальность и научная значимость темы, сформулированы основная цель и задачи исследований и аргументирована их научная новизна, показана практическая значимость полученных результатов, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** рассматриваются основные процессы, ответственные за взаимодействие радиального электрического поля и удержания плазмы в токамаке. В **параграфе 1.1** описаны основные свойства *H*-моды. К их числу относятся: увеличение времени удержания энергии, частиц и импульса, спад свечения линий нейтрального газа, существование порогов *LH*-перехода по мощности нагрева и плотности плазмы, подавление турбулентности на периферии плазмы. Подчеркивается универсальность *H*-моды, поскольку *LH*-переходы наблюдаются в токамаках и в стеллараторах с различными параметрами и размерами, как в диверторной, так и в лимитерной конфигурации магнитного поля, при дополнительном нагреве разного типа и в чисто омическом режиме токамака, и могут происходить как спонтанно, так и в результате инициирования различными воздействиями на плазму. В **параграфе 1.2** рассмотрены особенности *H*-моды в токамаке ТУМАН-3М. Перечислены основные экспериментальные сценарии, в которых наблюдалось переключение режима удержания – улучшение или ухудшение:

- Режим с интенсивным газонапуском при подъеме тока [A1];
- Режим с высокой плотностью (*HDM, High Density Mode*) [A2, A3]
- Самопроизвольный *LH*-переход под воздействием малого срыва во время первого подъема тока [A4];
- Омический *LH*-переход, инициированный импульсом газонапуска [A5];
- *LH*- и *HL*-переходы, инициированные поляризацией периферийной плазмы с помощью внесенного в плазму электрода [A6];
- *LH*-переход, вызванный инжекцией макрочастицы, испаряющейся в периферийной плазме [A7, A8];
- *LH*- и *HL*-переходы, вызванные воздействием на профиль плазменного тока и продольное электрическое поле [A9, A10, A11, A12, A15, A16, A17, A18, A19, A20, A21]:
 - *LH*-переход при магнитном сжатии или подъеме плазменного тока;
 - *HL*-переход при магнитной декомпрессии или сбросе тока;
- *LH*-переход при ионно-циклотронном нагреве [A22];
- *HL*-переход в результате развития периферийной тиринг-моды с низкими полоидальными и тороидальными числами m и n (вращающегося магнитного острова) [A23, A24, A25, A26, A27, A28];
- *LH*-переход при инжекции нагревного атомарного пучка как по направлению плазменного тока, так и навстречу ему [A29, A30, A31, A32, A33, A34, A35, A36].

На примере *H*-моды в омическом режиме обсуждаются основные черты этого режима в токамаке ТУМАН-3М. Рассматривается механизм подавления аномального переноса неоднородным течением плазмы, предложенный в [6] для объяснения механизма *LH*-перехода. Показано, что процессы, протекающие в плазме при *LH*-переходе, охвачены петлей положительной обратной связи: увеличение градиента давления на границе ведет к усилению радиального электрического поля, которое подавляет турбулентный перенос и тем самым еще сильнее увеличивает градиент давления. В параграфе 1.3 на основе анализа результатов экспериментов на токамаке ТУМАН-3М по созданию положительного или отрицательного радиального электрического поля в периферийной плазме с помощью электрода [A6, A7] сделаны выводы о влиянии приложенного извне радиального электрического поля на режим удержания плазмы:

- Радиальное электрическое поле обоих знаков, будучи достаточно сильным, способно вызвать переход в режим улучшенного удержания, однако порог *LH*-перехода по напряжению ниже для отрицательного поля, переход происходит быстрее, и степень улучшения удержания в этом случае выше;
- Приложенное извне положительное радиальное электрическое поле, складываясь с

«естественным» отрицательным радиальным полем, существующим на границе плазмы токамака, способно привести к отключению механизма подавления турбулентного переноса – т.е. к инициированию обратного (*HL*) перехода. Отмечается, что эти закономерности носят общий характер, и проявляются во всех экспериментах по исследованию переключения режима удержания на токамаке ТУМАН-3М (описанных в последующих главах), независимо от метода инициирования *LH*- или *HL*-перехода и механизма генерации радиального поля. В **параграфе 1.4** приведены описания методов и результатов измерения радиального электрического поля в омической *H*-моду в токамаке ТУМАН-3М. Обсуждаются применяемые на токамаке ТУМАН-3М методики измерения радиального электрического поля:

- Электростатические зонды – для измерения радиального поля на периферии шнура;
- НВР-диагностика – для измерения эволюции потенциала в центральной части шнура.

Обсуждаются сравнительные достоинства и недостатки этих взаимодополняющих методик, а также возможность использования данных других диагностик, применяемых на токамаке ТУМАН-3М и дающих дополнительную информацию о пространственно-временной динамике радиального электрического поля. В **параграфе 1.5** приведены результаты измерений радиального электрического поля на периферии плазменного шнура с помощью электростатических зондов [А37]. Показано, что с помощью данной диагностики подтверждается быстрое возникновение при омическом *LH*-переходе отрицательного радиального электрического поля величиной до $E_r = -2-3$ кВ/м на периферии плазмы. В **параграфе 1.6** описано применение НВР-диагностики для исследования эволюции потенциала при *LH*-переходе. Рассмотрены основные принципы работы диагностики и особенности применения ее в условиях эксперимента на токамаке ТУМАН-3М [А38]. Подчеркивается, что определение потенциала плазмы с помощью НВР-диагностики не связано с применением каких-либо моделей и гипотез, а основано лишь на законе сохранения энергии, что является несомненным достоинством диагностики. В то же время, для определения положения точки измерения потенциала (точки вторичной ионизации зондирующего пучка) необходимо проведение численного модельного расчета траекторий первичного и вторичного пучков с учетом реальной конфигурации магнитного поля в конкретной установке. Обсуждаются особенности применения НВР-диагностики на токамаке ТУМАН-3М, определяющиеся небольшим аспектным отношением этого токамака, $R/a=2.3$, из-за чего ток по плазме может быть достаточно высоким – до 170 кА, при относительно низком тороидальном магнитном поле – до 1 Тл. Низкое магнитное поле и небольшие размеры установки обуславливают невысокую энергию зондирующих ионов – до 100 кВ (для ионов K^+). В результате, ионные пучки НВР-диагностики испытывают

значительное (переменное во времени) тороидальное смещение, существенно осложняющее практическое применение данной методики. Приведены примеры детекторных сеток для типичных параметров эксперимента на токамаке ТУМАН-3М для зондирующих ионов Na^+ и K^+ , обеспечивающие возможность проведения измерений на периферии плазмы (Na^+) и в более центральных областях (K^+) [A39]. Обсуждается принцип работы, конструкция и разработанная методика калибровки на нейтральном газе анализатора энергии вторичных ионов [A40]. В параграфе 1.7 сформулированы выводы Главы 1.

Глава 2 посвящена экспериментам по исследованию переключения режимов удержания плазмы при динамическом воздействии на плазменный шнур, вызывающем модификацию профиля плазменного тока (сжатие/декомпрессия плазмы и подъем/сброс тока по плазме). В параграфе 2.1 обсуждаются возможные физические механизмы влияния профиля плазменного тока на удержание. Отмечается, что экспериментальные данные, полученные на других установках, свидетельствуют как о благоприятном воздействии сужения профиля тока на удержание (токамаки DIII-D [6], JPP T-IIU [8] и JET [9]), так и о существовании противоположного эффекта – ухудшении удержания при сужении профиля тока (токамак COMPASS [9]). Рассматриваются особенности экспериментов на токамаке ТУМАН-3М по исследованию переключения режима удержания в результате быстрого подъема/сброса плазменного тока, а также быстрого магнитного сжатия/магнитной декомпрессии плазменного шнура. Показано, что эти воздействия на плазменный шнур должны сопровождаться значительным возмущением профиля тока, поскольку характерное время этих процессов ($\Delta\tau \sim 3\text{-}4$ мс) меньше, чем среднее время диффузии тока в токамаке ТУМАН-3М $\tau_i \sim 50$ мс. Рассмотрено выполнение условия замороженности магнитного поля в веществе (магнитное число Рейнольдса $R_m \gg 1$). Показано, что это условие, вследствие сильной неоднородности электронной температуры по сечению токамака, выполнено только для центральной части плазмы. Поэтому в экспериментах с магнитным сжатием/декомпрессией периферийная область плазмы остается неподвижной, что и обуславливает, в конечном итоге, генерацию в ней радиального электрического поля и инициирование *LH*- и *NL*-переходов. С другой стороны, в описываемых экспериментах время сжатия/декомпрессии и подъема/сброса плазменного тока было сравнимо со временем удержания энергии: $\Delta\tau \sim \tau_E \sim 2\text{-}4$ мс, таким образом, условие адиабатичности воздействия не выполнялось. Поэтому в данных экспериментах трудно было бы ожидать сильного прямого эффекта (в смысле изменения температуры и плотности плазмы) от воздействия на плазменный шнур. Далее кратко описываются первые эксперименты на токамаке ТУМАН-3 по динамическому воздействию на плазменный шнур – одновременному магнитному сжатию, подъему плазменного тока и увеличению плотности плазмы [A2, A3], а также

эксперименты с быстрым сбросом плазменного тока в омической H -моду [A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A17]. Несмотря на то, что в обоих случаях имело место сужение профиля плазменного тока, в эксперименте с магнитным сжатием сужение профиля тока сопровождалось переходом в режим хорошего удержания – H -моду, а при сбросе тока в H -моду, наоборот, наблюдался обратный переход к режиму плохого удержания – HL -переход. На основании этого делается предположение, что возможность и направление переключения удержания определяются не эволюцией собственно профиля тока, но какими-то другими механизмами. В **параграфе 2.2** на примере эксперимента с быстрым сбросом или подъемом плазменного тока обсуждается применимость модели генерации радиального электрического поля и переключения удержания плазмы, предложенной в [10, 12]. Эта модель учитывает влияние электронного дрейфа Уэйра [13] на генерацию радиального электрического поля в периферийной плазме, которое в свою очередь вызывает подавление турбулентного переноса радиально-неоднородным вращением плазмы в скрещенных полях. Важной особенностью данного механизма является то, что величина и знак генерируемого радиального тока и радиального электрического поля определяются величиной и знаком скорости электронного дрейфа Уэйра, а значит, величиной тороидального электрического поля E_ϕ и направлением его по отношению к направлению вектора полного магнитного поля. В стационарном режиме работы токамака направление тороидального электрического поля совпадает с направлением тока по плазме, в результате чего дрейф Уэйра направлен к центру шнура. Однако, в эксперименте с достаточно быстрым сбросом тока или с магнитной декомпрессией направление тороидального электрического поля на периферии шнура может измениться на противоположное, что ведет к изменению направления электронного дрейфа Уэйра, а значит, и к изменению направления полного радиального тока, так как ионы на периферии токамака ТУМАН-3М в дрейфе Уэйра практически не участвуют в силу высокой столкновительности. Это вызывает уменьшение радиального электрического поля, а значит и его шира $|dE_r/dr|$, и может приводить к отключению механизма подавления аномального переноса, ответственного за улучшение удержания в H -моду. Напротив, быстрый подъем плазменного тока, как и магнитное сжатие, сопровождается увеличением тороидального электрического поля, направленного по току плазмы, что вызывает усиление электронного дрейфа Уэйра к центру шнура. Это должно приводить к усилению отрицательного (направленного к центру) радиального электрического поля, что, в свою очередь, при достаточной величине шира электрического поля $|dE_r/dr|$, может вызвать подавление турбулентного переноса частиц и энергии – т.е., переход в H -моду. Таким образом, данная модель связывает генерацию радиального электрического поля (величину и знак возмущения E_r), а значит и возможность переключения удержания, не с возмущением собственно профиля тока в плазме, но с

изменением тороидального электрического поля E_ϕ , вызванного воздействием на профиль тока. Приводится численная оценка величины обсуждаемого эффекта, которая дает (для эксперимента с быстрым подъемом тока, рассмотренного в следующем параграфе) величину возмущения радиального электрического поля порядка $\Delta E_r \sim -2.2$ кВ/м. Это поле заметно превышает стационарное неоклассическое значение $E_r^{neo} \sim -1$ кВ/м. Делается предположение о важности столь сильного возмущения радиального электрического поля для возможности инициирования *LH*-перехода. Обсуждается применение этой модели для объяснения экспериментов с магнитным сжатием/декомпрессией плазменного шнура, в которых также наблюдается переключение режима удержания. В **параграфе 2.3** приводятся результаты экспериментов по исследованию переключения удержания при быстром подъеме/сбросе плазменного тока, а также магнитном сжатии/декомпрессии плазменного шнура по малому радиусу [A12]. Эти процессы были быстрыми, в указанном выше смысле. Относительное изменение магнитного поля и плазменного тока выбиралось небольшим, чтобы исключить возможную зависимость удержания от абсолютных значений этих параметров. Напуск рабочего газа в течение всего разряда поддерживался примерно постоянным, что позволяло легко идентифицировать улучшение (ухудшение) удержания частиц по росту (спаду) плотности плазмы. В части экспериментов (сброс тока и магнитное сжатие) происходило сужение профиля тока, в остальных (магнитная декомпрессия и подъем тока) – расширение. При подъеме тока и магнитном сжатии наблюдалось увеличение тороидального электрического поля E_ϕ , а при сбросе тока и магнитной декомпрессии – смена его направления на противоположное. Эксперименты проводились в двух исходных режимах удержания – в *L*- и *H*-моде. Подчеркивается, что в исследованных 8 экспериментальных сценариях имелась возможность разделить влияние возмущения профиля тока и тороидального электрического поля на возможность переключения удержания. Приводятся результаты численного моделирования эксперимента с подъемом плазменного тока в токамаке ТУМАН-3М [5], подтверждающие усиление радиального электрического поля и его ширину на границе шнура. Дополнительные свидетельства в пользу обсуждаемого механизма инициирования переключения удержания при воздействии на профиль тока получены с помощью рефлектометрической СВЧ-диагностики. При подъеме плазменного тока или магнитном сжатии отмечается характерное для *LH*-переходов уменьшение уровня флуктуаций в области относительно высоких частот (> 400 кГц) и, соответственно, сужение спектра отраженного сигнала [A22]. Напротив, при сбросе плазменного тока в *L*-моду ширина спектра рассеянного излучения не меняется, в согласии с отсутствием переключения режима удержания в таком сценарии. С использованием этой диагностики обнаружено [A12] увеличение скорости полоидального вращения плазмы до $v_\theta \sim 2.5$ км/с, и генерация

отрицательного радиального электрического поля величиной $E_r^H \sim -2$ кВ/м в H -моду, инициированной подъемом тока, что хорошо согласуется со сделанной выше на основе рассматриваемой модели влияния дрейфа Уэйра оценкой $\Delta E_r \sim -2.2$ кВ/м. Кроме того, в этих измерениях обнаружено, что изменение скорости вращения (и генерация радиального электрического поля) происходят за ~ 1 мс до LH -перехода, что отражает наличие причинно-следственной связи между этими явлениями: именно изменение скорости полоидального вращения и радиального электрического поля вызывает переключение режима удержания, а не наоборот.

В параграфе 2.4 обобщаются результаты проведенных экспериментов по магнитному сжатию/расширению и подъему/сбросу плазменного тока. Показано, что переключение режима удержания в этих экспериментах не связано с характером возмущения профиля тока. Так, LH -переход происходит как при сужении профиля тока при магнитном сжатии, так и при его уширении при подъеме тока. LH -переход имеет место как при магнитной декомпрессии, сопровождающейся уширением профиля тока, так и при сбросе тока, при котором профиль тока сужается. С другой стороны, наблюдается корреляция направления переключения удержания и знака возмущения продольного электрического поля: усиление последнего сопровождается LH -переходом, ослабление – HL -переходом. Показано, что рассмотренный выше механизм генерации радиального электрического поля под воздействием возмущения тороидального электрического поля адекватно описывает результаты экспериментов по переключению режима удержания при магнитном сжатии/расширении плазмы и подъеме/сбросе тока по плазме. Обсуждаются результаты описанных выше экспериментов по переключению режима удержания при динамическом воздействии на профиль тока с точки зрения возможных альтернативных моделей инициирования LH -перехода. Показано, что изменение магнитного шира и мощности нагрева, а также стабилизация или дестабилизация пилинг-моды при описанных воздействиях не могут быть причиной наблюдаемого переключения удержания. В **параграфе 2.5** проводится аналогия между экспериментами по инициированию переключения удержания при динамическом воздействии на плазменный шнур и при поляризации периферийной плазмы. Отмечается, что несмотря на разную природу «стороннего» радиального тока, механизм переключения удержания в этих двух группах экспериментов одинаков: усиление отрицательного радиального электрического поля (сопровождающееся усилением его неоднородности) приводит к подавлению турбулентного переноса и инициированию LH -перехода, ослабление радиального поля ведет к отключению механизма подавления турбулентного переноса и инициированию обратного (HL) перехода. Соответственно, в обоих случаях, к улучшению удержания (LH -переходу) приводит

воздействие, усиливающее «естественное» отрицательное радиальное электрическое поле, и наоборот, воздействие, ведущее к ослаблению отрицательного радиального электрического поля, вызывает ухудшение удержания. В **параграфе 2.6** сформулированы выводы к Главе 2.

Глава 3 посвящена исследованию модификации радиального электрического поля и переключения режима удержания при наличии в плазме токамака МГД-возмущения типа вращающегося магнитного острова. В **параграфе 3.1** кратко рассмотрены общие свойства МГД-колебаний в токамаке, особенности проявления и регистрации МГД-активности в экспериментах на токамаке ТУМАН-3М. Изложены теоретические представления о влиянии магнитного острова на генерацию радиального электрического поля в окружающей плазме и процессы переноса в ней. В частности, описывается модель [14], предсказывающая генерацию вблизи острова радиального электрического поля с величиной $E_r^{island} = \langle B_T \rangle \cdot \omega \cdot r / m$, где $\langle B_T \rangle$ – усредненное по магнитной поверхности тороидальное магнитное поле, ω – угловая частота вращения острова, r – радиус резонансной поверхности, m – полоидальное модовое число. В **параграфе 3.2** приводятся основные характеристики магнитных островов в токамаке ТУМАН-3М. Описана разработанная В.А.Корневым [15] и используемая в данной работе при обработке экспериментальных данных процедура восстановления характеристик МГД-островов (радиуса локализации резонансной магнитной поверхности, ширины острова и полоидального модового числа) по возмущению профиля плотности плазмы и сигналам полоидального массива магнитных зондов. В **параграфе 3.3** приведены результаты экспериментальных исследований радиального электрического поля вблизи острова и влияния острова на переключение режима удержания [A23, A25]. В ходе измерений радиального электрического поля с помощью двухэлектродного зонда на периферии шнура при сильной МГД-активности обнаружено, что на начальной стадии эволюции острова, пока его размер мал, а скорость вращения сравнительно велика, радиальное электрическое поле отрицательно и имеет величину порядка -2 кВ/м, что хорошо согласуется с предсказанием теории [14]. По мере замедления вращения острова и увеличения его размера, происходит отклонение величины экспериментально измеренного поля от предсказаний теории: сначала поле уменьшается по абсолютной величине, оставаясь отрицательным, а потом меняет знак и достигает положительного значения $E_r \sim 4$ кВ/м. При этом, направление вращения острова остается неизменным, и соответствует $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфу в отрицательном поле. Обнаружено, что генерация положительного радиального электрического поля под воздействием МГД-активности (или, в некоторых разрядах, в зависимости от уровня МГД-активности, уменьшение до нуля первоначально отрицательного поля) может приводить к ухудшению удержания в H-моде, вплоть до ее отключения (HL-переходу) [A26, A27], см. Рисунок 1. С помощью НВР-диагностики измерено положительное возмущение электрического

потенциала в центральной части плазменного шнура, вызванное МГД-активностью, величиной до $\Delta\Phi_{pl} \sim 600$ В, соответствующее генерации положительного среднего радиального электрического поля величиной $\langle \delta E_r \rangle \approx -\Delta\Phi_{pl}/\Delta r \approx 5$ кВ/м.

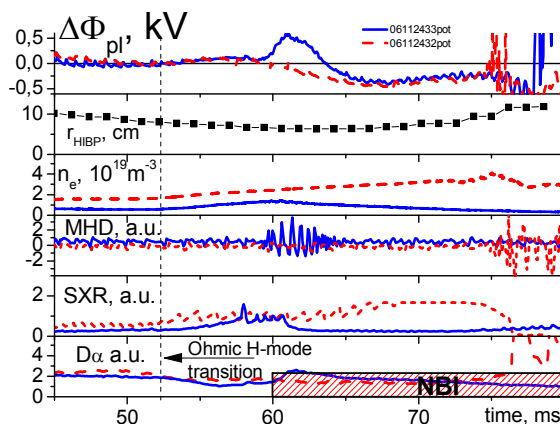


Рисунок 1 — HL-переход под воздействием вспышки МГД активности на фронте импульса NBI-нагрева (сплошные линии). Разряд без HL-перехода (пунктирные линии). Сверху вниз: потенциал плазмы, радиальная координата точки измерения HIBP-диагностики, плотность плазмы, сигнал МГД-зонда, интенсивность мягкого рентгеновского излучения, интенсивность свечения линии D_α

Проведено сравнение с результатами измерений скорости полоидального вращения плазмы с помощью доплеровской СВЧ-рефлектометрии, которые также свидетельствуют об изменении знака радиального электрического поля на периферии шнура под воздействием вспышки МГД-активности [16]. Предложено объяснение генерации положительного радиального электрического поля нескомпенсированными потерями электронов вдоль стохастизированных силовых линий магнитного поля при развитии в периферийной плазме интенсивной МГД-активности. Приводятся результаты измерений «жесткости» и интенсивности вспышек рентгеновского излучения из плазмы, коррелирующих со вспышками МГД-активности, подтверждающие значительные потери надтепловых электронов из плазмы. Этот механизм генерации положительного радиального электрического поля под воздействием МГД-активности подробно рассмотрен в **параграфе 3.4**. Обсуждается модель генерации радиального электрического поля в результате потерь надтепловых электронов вдоль силовых линий магнитно поля, стохастизированного в результате наличия в плазме токамака цепочки магнитных островов, предложенная в [17, 18]. Показано, что для параметров периферийной плазмы токамака ТУМАН-3М поле, вычисленное в рамках модели, приблизительно совпадает по величине с наблюдаемым в

эксперименте. Также, эта модель привлекается для объяснения наблюдаемого в эксперименте проникновения положительного радиального электрического поля в центральную часть плазмы, внутреннюю по отношению к радиусу резонансной поверхности острова. Сравнение результатов с данными, полученными на других установках, проводится в **параграфе 3.5**. Показано, что полученные в ходе экспериментов на токамаке ТУМАН-3М результаты хорошо согласуются с результатами исследований на токамаках CSTN-II [19], TEXT [20], TEXTOR [21] и TORE-SUPRA [22], в которых стохастическое возмущение магнитного поля на границе шнура создавалось искусственно с помощью специальных внешних обмоток, приводя к формированию эргодического лимитера (CSNT-II, TEXT) или эргодического дивертора (TEXTOR, TORE-SUPRA). Во всех перечисленных экспериментах наблюдалось положительное возмущение радиального электрического поля в результате создания стохастического слоя, величина возмущения электрического поля составляла 5-10 кВ/м. В **параграфе 3.6** сформулированы выводы к Главе 3.

Глава 4 посвящена исследованию характеристик радиального электрического поля и особенностей перехода в режим улучшенного удержания при инжекционном нагреве. В **параграфе 4.1** обсуждается влияние геометрии эксперимента по инжекции нагревного пучка в плазму токамака на параметры плазмы. Кратко обосновывается необходимость применения методов дополнительного нагрева плазмы, и в частности – инжекционного. Обсуждаются возможные схемы пучкового нагрева, а именно – инжекция атомарного пучка по току плазмы (ко-инжекция), и инжекция навстречу току плазмы (контр-инжекция). Приводятся результаты моделирования дрейфовых траекторий быстрых ионов в условиях эксперимента на токамаке ТУМАН-3М этих двух случаях, обсуждаются их преимущества и недостатки. В **параграфе 4.2** обсуждается наблюдаемое на многих токамаках явление заметного снижения пороговой плотности n_{thr} , необходимой для LH -перехода, при контр-инжекции нагревного атомарного пучка, по сравнению с ко-инжекцией и с другими сценариями LH -перехода. Отмечается, что LH -переход в этих условиях происходит при низкой эффективности столкновительной передаче энергии и импульса от пучка плазме. Приводятся результаты исследования порога по плотности для LH -перехода на различных токамаках, обсуждаются возможные механизмы, ответственные за возникновение данного эффекта. Обсуждаются результаты экспериментов на токамаке ТУМАН-3М, в которых также наблюдалось существенное облегчение условий LH перехода при изменении направления инжекции с ко-на контр-инжекцию [A29, A33]. Обнаружено, что при омическом нагреве и при инжекции атомарного пучка в направлении, совпадающем с направлением тока плазмы значение предельной плотности составляет $n_{thr} \approx 1.25 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. При других воздействиях, таких как поляризация периферийной плазмы, инжекция макрочастицы и контр-инжекция атомарного

пучка, значение пороговой плотности существенно уменьшается, вплоть до $n_{\text{thr}} \approx 0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при контр-инжекции. Формулируется предположение о том, что этот эффект может быть связан с разной величиной и механизмом генерации радиального электрического поля в этих режимах. В параграфе 4.3 приводятся результаты измерений радиального электрического поля и скорости вращения плазмы при инжекции атомарного пучка в направлении навстречу току плазмы в токамаке ТУМАН-3М. Рассмотрены особенности генерации радиального электрического поля в такой конфигурации и обсуждается его роль в инициировании *LH*-перехода при низкой плотности плазмы под воздействием импульса инжекционного нагрева. Основные результаты этих исследований опубликованы в [A26, A27, A28, A29, A30, A31, A32, A33, A34, A35, A36]. Обсуждаются особенности эксперимента на токамаке ТУМАН-3М по контр-инжекции атомарного пучка в плазму низкой плотности – порядка $0.5\text{-}1.0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Отмечается, что в этих условиях, ввиду неэффективной столкновительной передачи энергии и импульса от пучка плазме, возмущение ионной температуры и скорости тороидального вращения пренебрежимо малы. Поэтому возмущение радиального электрического поля может возникать только в результате действия какого-то иного механизма. Подчеркивается, что в таком сценарии наблюдается *LH*-переход при очень низкой плотности плазмы (до $0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$), при которой отсутствует *LH*-переход в других сценариях (ко-инжекция, омический нагрев и др.). На основе зарегистрированного уменьшения вдвое, с $\sim 20 \text{ В}$ до $\sim 10 \text{ В}$, уровня флуктуаций плавающего потенциала $\langle (\phi_{\text{float}} - \langle \phi_{\text{float}} \rangle)^2 \rangle^{0.5}$ на периферии плазмы, и оценки источника заряженных частиц, вызванного ионизацией атомов инжектируемого пучка [A34], делается вывод об улучшении удержания частиц в этом режиме. Обнаружено, что после *LH*-перехода, вызванного импульсом нейтральной инжекции, потенциал в центральной части шнура становится более отрицательным (по сравнению с аналогичным омическим разрядом), амплитуда возмущения достигает $\sim 400 \text{ В}$. На основании этих измерений делается оценка среднего радиального электрического поля, возникающего в этом эксперименте: $\Delta E_r = -\Delta \Phi_{\text{pl}} / (a_1/2) \approx -4 \cdot 10^3 \text{ В/м}$, здесь $a_1 = 22 \text{ см}$ – радиус диафрагмы. Как следует из результатов зондовых измерений, после *LH*-перехода радиальное электрическое поле на периферии плазмы начинает быстро снижаться, и за время $\sim 1.2\text{-}1.4 \text{ мс}$ величина изменения радиального электрического поля достигает $\Delta E_r = -4 \text{ кВ/м}$, что совпадает с оценкой изменения радиального электрического поля, полученной из измерений возмущения потенциала в центральной части плазмы с помощью НВР диагностики. Проводится сравнение временного поведения электрического потенциала в центральной части плазмы при *LH*-переходе, инициированном контр-инжекцией, и при обычном омическом *LH*-переходе. Как отмечается в Главе 1, в омическом режиме также наблюдается уменьшение электрического потенциала, однако в этом случае при малой плотности плазмы

изменение потенциала происходит медленно – за время порядка 8-10 мс после *LH*-перехода. В отличие от этого, в эксперименте с *LH*-переходом, инициированным импульсом контр-инъекции, изменение потенциала начинается практически одновременно с формированием транспортного барьера. Различие в скорости изменения потенциала плазмы в этих двух режимах при формировании периферийного транспортного барьера может быть объясняется в рамках механизма, обсуждаемого далее подробно в параграфе 5.4. При инъекции атомарного пучка навстречу плазменному току в области $a/2 < r < a$ происходит непосредственная генерация радиального электрического тока и радиального электрического поля практически одновременно с возникновением радиального тока неудерживаемых быстрых ионов. Поэтому потенциал в точке измерения НВР-диагностики (вблизи $r \sim a/2$) также реагирует на импульс контр-инъекции практически без задержки. Напротив, при омическом *LH*-переходе радиальное электрическое поле меняется быстро лишь в области транспортного барьера на периферии плазмы, вблизи $r \sim 0.9 a$, в то время как в более глубоких областях плазмы потенциал меняется позднее, по мере перестройки профилей температуры и плотности под воздействием образовавшегося периферийного транспортного барьера. Генерация отрицательного радиального электрического поля при контр-инжекции подтверждается также наблюдениям усиления тороидального вращения плазмы, несмотря на низкую эффективность столкновительной передачи импульса и энергии от пучка плазме. Такой эффект объясняется значительными потерями быстрых ионов, возникающими при инъекции нагревного пучка в направлении навстречу плазменному току. Приводятся результаты измерения доплеровского сдвига линии иона бора B^{3+} с длиной волны $\lambda = 282.2$ нм и максимальной светимостью вблизи магнитной поверхности $r = 0.6 a$. Во время импульса контр-инъекции наблюдается сдвиг контура данной линии на $\sim 0.011 \pm 0.004$ нм, что, с учетом геометрических факторов, дает величину изменения скорости тороидального вращения соответствующих ионов $v_{\phi} = 16 \pm 6$ км/с в области $r = 0.6 a$. При проведении данных измерений с целью увеличения отношения сигнал/шум пришлось использовать значительное время интегрирования сигнала – до 10 мс, что определило низкое временное разрешение полученных результатов и не позволило детально исследовать временную динамику тороидального вращения при *LH*-переходе. Скорость тороидального вращения, измеренная по сдвигу линии C^{2+} , оказалась меньше погрешности измерения. В **параграфе 4.4** приводится количественная оценка величины радиального электрического поля, генерируемого в плазме в результате потерь быстрых ионов, и скорости тороидального вращения плазмы под воздействием этого поля. Модель предполагает, что генерация радиального электрического поля и тороидального вращения связаны именно с сильными потерями быстрых ионов, вызывающими протекание «стороннего» радиального

электрического тока быстрых ионов I_{fast} . Этот ток компенсируется встречным радиальным током I_r основных ионов, равным по величине и противоположным по направлению $I_r = -I_{fast}$. Тороидальная сила Ампера $I_r \times B_\theta$ приложена к основным ионам плазмы и должна вызывать тороидальное вращение в направлении навстречу току плазмы. Теоретическое рассмотрение данного механизма генерации тороидального вращения приведено в [28]. Можно утверждать, что данный механизм генерации вращения подобен рассмотренному выше механизму генерации радиального электрического поля и тороидального вращения под воздействием потерь быстрых электронов в стохастическом слое, использованному в Главе 3 для объяснения генерации положительного радиального электрического поля вблизи магнитного острова. Предполагая, что в стационарном состоянии сила Ампера должна компенсироваться потерей импульса, вызванной уходящими на стенку быстрыми ионами, $[I_r \times B_\theta] \cdot \delta r = (m_i \cdot \bar{n} \cdot V_{pl} \cdot v_\phi) / \tau_\phi$ (здесь B_θ – полоидальное магнитное поле, $\delta r = a_1 - r_{FB}$, $r_{FI} \sim a_1 / 2$ – средний радиус, на котором происходит ионизация атомов пучка, m_i – масса иона, \bar{n} – средняя плотность плазмы, V_{pl} – ее объем, τ_ϕ – время удержания тороидального импульса), можно оценить скорость тороидального вращения. Полагая $\tau_\phi = \tau_E$, из этого уравнения можно получить оценку скорости тороидального вращения $v_\phi = 30$ км/с, близкую к результатам спектроскопических измерений скорости тороидального вращения примеси B^{3+} по доплеровскому сдвигу соответствующей линии. С другой стороны, используя уравнение радиального баланса сил и предполагая, что сила Лоренца $v_\phi \times B_\theta$ уравновешивается радиальным электрическим полем E_r , можно получить оценку отрицательного радиального электрического поля $E_r = -5$ кВ/м, что согласуется с результатами измерений с помощью зондов и НВР диагностики. Делается вывод о пригодности данной модели для качественного и количественного описания процесса генерации радиального электрического поля и тороидального вращения при контр-инжекции в токамаке ТУМАН-3М. Отмечаются недостатки модели, в первую очередь – применимость ее только для описания установившегося состояния плазмы до или после LH -перехода, но не самого процесса перехода. В частности, за рамками данной модели остается вопрос о первичности генерации тороидального вращения или радиального электрического поля при формировании периферийного транспортного барьера под воздействием импульса контр-инжекции. Отмеченное выше низкое временное разрешение произведенных в этом эксперименте спектроскопических измерений (~ 10 мс) не позволяет сделать выводы о причинно-следственной связи между изменениями скорости тороидального вращения, радиального электрического поля и режима удержания. Тем не менее, можно утверждать, что именно изменение радиального электрического поля вызывает переключение удержания при формировании транспортного барьера. В пользу такого вывода свидетельствует тот факт, что

в области транспортного барьера ($r = 0.9 a$) скорость тороидального вращения примеси C^{2+} мала и не меняется при LH -переходе (с точностью до погрешности измерения), в то время как радиальное электрическое поле в этой области, измеренное электростатическими зондами, меняется практически синхронно с переключением режима удержания. Подчеркивается аналогия между механизмами инициирования LH -перехода в токамаке ТУМАН-3М в экспериментах с ИЦН [A22] и контр-инжекцией: в обоих случаях роль «стороннего» тока, вызывающего генерацию радиального электрического поля, играют теряющиеся из плазмы быстрые ионы. Далее проводится сравнение полученных на токамаке ТУМАН-3М результатов с данными экспериментов на других установках. Так, на токамаке DIII-D также наблюдалось существенное облегчение условий LH -перехода (снижение пороговой мощности инициирования LH -перехода) при переходе от инжекции момента по направлению плазменного тока к сбалансированной инжекции (или, в другом сценарии, к инжекции навстречу току) [29, 30]. В этих экспериментах, однако, не обнаружилось зависимости пороговой мощности LH -перехода и величины радиального электрического поля от доли неудерживаемых быстрых ионов. Возможно, это связано с тем, что указанные эксперименты проводились при существенно более высокой плотности плазмы – до $2.4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, при которой основным является столкновительный механизм передачи импульса и энергии от пучка плазме. Обсуждается модель инициирования LH -перехода, связывающая его возникновение с прогревом периферийной плазмы и применяемая на многих токамаках, таких как JET [31], ALCATOR [32] и DIII-D [29], для интерпретации результатов экспериментов. Показано, что такая модель не может адекватно описать обсуждаемые эксперименты на токамаке ТУМАН-3М в силу малости поглощаемой в плазме мощности атомарного пучка. Обсуждается возможная роль в процессе LH -перехода в токамаке ТУМАН-3М пиллинг-моды [33], отмечается, что этот механизм также не может быть привлечен для объяснения наблюдаемых процессов. В **параграфе 4.5** обсуждаются результаты экспериментов по инжекции атомарного пучка навстречу плазменному току в H -моду, т.е. после омического LH -перехода. Показано, что и в этом режиме инжекция атомарного пучка приводит к усилению отрицательного радиального электрического поля, что сопровождается некоторым улучшением удержания плазмы. Отмечается, что в отдельных случаях инжекция атомарного пучка сопровождается вспышкой МГД-активности, которая ведет к отключению режима хорошего удержания – т.е. HL -переходу. Как показано ранее в Главе 3, вспышка МГД-активности сопровождается возникновением положительного потенциала $\Delta\Phi_{pl} \sim 700 \text{ В}$ в центральной части плазмы и генерацией положительного радиального электрического поля $\langle \delta E_r \rangle \sim 3.2 \text{ кВ/м}$, которое, по-видимому, и вызывает HL -переход. В **параграфе 4.6** приводятся заключительные замечания по исследованию

радиального электрического поля и переключения режима удержания плазмы в токамаке. Обобщая результаты проведенных исследований, делается вывод, что во всех исследованных экспериментальных сценариях возможность и направление переключения удержания определяются знаком (и величиной) радиального электрического поля, возбуждаемого в плазме в результате воздействия. Инициирование перехода к хорошему удержанию (*LH*-перехода) происходит при возбуждении в периферийной плазме положительного «стороннего» тока, компенсируемого отрицательным током основных ионов, который, в свою очередь, сопровождается генерацией отрицательного радиального электрического поля. Напротив, генерация отрицательного «стороннего» тока сопровождается протеканием компенсирующего его положительного радиального тока основных ионов и приводит к генерации положительного радиального электрического поля и отключению режима хорошего удержания (*HL*-переходу). Данный эффект не зависит от природы «стороннего» тока: например, в случае магнитного сжатия он переносится дрейфующими в центр плазмы запертыми электронами, а при контр-инжекции – теряющимися из плазмы быстрыми ионами. В обоих случаях наблюдается инициирование *LH*-перехода. В экспериментах по поляризации периферийной плазмы с помощью внесенного в плазму электрода роль «стороннего» ток играет ток, протекающий по электроду. Поскольку «естественное» радиальное электрическое поле в токамаке на периферии плазмы обычно отрицательно, достижение необходимой для подавления аномального переноса величины шир радиального электрического поля легче достигается в случае отрицательного возмущения радиального электрического поля. Наоборот, ослабление «естественного» поля в результате положительного возмущения уменьшает шир радиального электрического поля и может привести к отключению подавления турбулентного переноса. Этим объясняется инициирование *LH*-перехода отрицательным возмущением радиального электрического поля, и отключение *H*-моды (*HL* переход) при возникновении положительного возмущения. В принципе, если положительное возмущение достаточно велико, радиальное электрическое поле на границе шнура может изменить знак, и величина шир также может оказаться достаточной для выполнения условия подавления турбулентности. Очевидно, однако, что для этого требуется более сильное возмущение радиального электрического поля, чем в случае отрицательно возмущения. В рамках этого подхода может объясняться и наблюдавшееся на эксперименте слабое воздействие возмущения радиального электрического поля на удержание в случае, если знак этого возмущения и исходный режим плазмы находятся в «неблагоприятном» для переключения режима удержания сочетании. Отрицательное (положительное) возмущение радиального электрического поля не может инициировать переход к хорошему (плохому) удержанию, если исходный режим удержания

– *H*-мода (*L*-мода). Например, магнитное сжатие не влияет на режим удержания, если плазма изначально находится в режиме хорошего удержания – *H*-моде. Аналогично, сброс тока в *L*-моду не вызывает заметного ухудшения удержания, если исходный режим – *L*-мода. Таким образом, и в этих экспериментах проявляется бифуркационный характер *LH*- и *HL*-переходов, для которых возмущение радиального электрического поля соответствующего знака играет роль триггера. В **параграфе 4.7** сформулированы выводы Главы 4.

В **Главе 5** приведены результаты исследований геодезической акустической моды (GAM) и взаимосвязи ее с процессом переключения удержания. **Параграф 5.1** посвящен краткому изложению общих свойств зональных течений – радиально локализованных, однородных в тороидальном и полоидальном направлении ($m = n = 0$) областей с медленно меняющимися во времени скоростью полоидального вращения плазмы и радиальным электрическим полем – т.н. зональных течений (ZF, *Zonal Flow*). Разновидность ZF с ненулевой, но низкой частотой порядка 10-100кГц получила название геодезической акустической моды. Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований ZF и GAM, их свойств и роли в регуляции аномального переноса. Рассмотрена простая магнитогидродинамическая модель GAM, предложенная Винзором [23]. Обосновывается возможность регистрации GAM (в случае если длина волны GAM не слишком мала по сравнению с размером области ее локализации) с помощью НВР-диагностики при измерении колебаний потенциала в центральной части плазмы. В **параграфе 5.2**, приведены результаты исследования GAM на токамаке ТУМАН-3М с помощью диагностического пучка тяжелых ионов и с привлечением данных других диагностик. Обсуждаются методические аспекты, связанные с регистрацией GAM с помощью НВР-диагностики. Обычно колебания, идентифицируемые как GAM, наблюдаются в токамаке ТУМАН-3М на начальной стадии разряда, во время первого подъема тока [A26, A27, A41, A42], когда профиль тока еще не достигает своего равновесного распределения. GAM-колебания продолжаются обычно до момента *LH*-перехода, или до конца разряда – если весь разряд проходит в *L*-моду. Детальное сравнение спектров GAM-подобных колебаний и сигналов электромагнитных зондов позволяет отличить их от «обычных» МГД-колебаний. В токамаке ТУМАН-3М частота МГД-колебаний обычно лежит в диапазоне 5-12 кГц, а частота колебаний, идентифицируемых как GAM – вблизи 30 кГц. Таким образом, эти явления хорошо разделены в частотной области и могут быть легко идентифицированы, см. Рисунок 2. Частота наблюдаемых колебаний потенциала – порядка 30кГц – близка к значениям, предсказываемым теорией [24, 25] $f = (1/2\pi R)(T_e/m_i)^{0.5}$ в предположении $R = 53\text{см}$, $m_i = 2$ а.е.м. (рабочий газ - дейтерий) $T_e \sim 100$ эВ, $T_i \ll T_e$. На примере исследования (с помощью НВР-диагностики) возмущения

потенциала и локальной плотности плазмы в разряде с сосуществующими GAM и пилообразными колебаниями показано, что точка детектирования колебаний потенциала на частоте GAM расположена в области плазмы внутри радиуса перемешивания пилообразных колебаний.

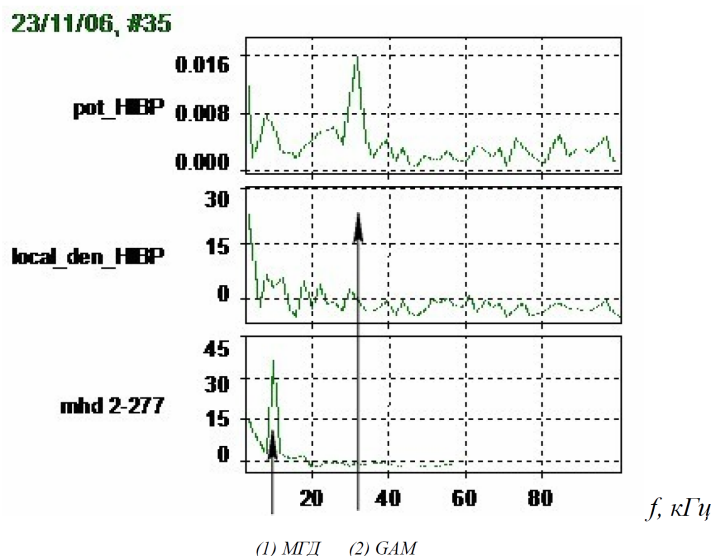


Рисунок 2 — Сверху вниз: спектры колебаний потенциала плазмы и локальной плотности, измеренных с помощью НВР-диагностики, спектр сигнала МГД-зонда. Стрелками показаны пики МГД-колебаний (1) и GAM-колебаний (2).

В исследуемых режимах этот радиус лежит в диапазоне $r_s \approx 5-10$ см, что согласуется с результатами численного моделирования траекторий ионных пучков НВР-диагностики, которое для условий описываемого эксперимента дает положение точки измерения $r_{\text{НВР}} = 8$ см. Наблюдение GAM в спектре колебаний в центральной части плазменного шнура может рассматриваться как косвенное подтверждение не слишком малой радиальной длины волны GAM $\lambda_r^{\text{gam}} \geq L_r$. Обсуждается возможная роль этого эффекта (возмущения потенциала в центральной области под воздействием периферийной GAM с $\lambda_r^{\text{gam}} \geq L_r$) в экспериментах на токамаке T-10, в которых наблюдалось постоянство по радиусу частоты и амплитуды возмущения потенциала, вызванного GAM [26]. Обсуждаются возможные причины отсутствия колебаний на частоте GAM на сигналах других «рутинных» диагностик. Они связаны со свойствами GAM и особенностями конкретных диагностических методик. Так, отсутствие колебаний на хордовых сигналах СВЧ-интерферометра с вертикальными хордами объясняется полоидальным модовым числом $m=1$ возмущения плотности плазмы при возникновении GAM. Малая величина возмущения распределения плотности тока по плазме при возникновении GAM объясняет отсутствие сигналов на частоте GAM на сигналах МГД-

зондов. Единственной диагностикой, кроме НВР, с помощью которой удалось наблюдать и исследовать GAM-колебания на токамаке ТУМАН-3М, является доплеровская СВЧ-рефлектометрия. С помощью этой диагностики были зарегистрированы колебания скорости полоидального вращения флуктуаций электронной плотности плазмы с частотой в диапазоне 20-40кГц и модуляция уровня фоновой турбулентности с той же частотой и с фазовым сдвигом (относительно GAM) порядка π , возникающие на периферии шнура во время перехода в омическую *H*-моду [27]. С помощью НВР-диагностики выявлена связь динамики колебаний потенциала на частоте GAM с переключением режима удержания [A41, A42]. Обнаружено, что геодезическая акустическая мода, при достаточно низкой плотности плазмы, развивается в фазе плохого омического удержания – в омической *L*-моду; после омического *LH* перехода колебания на частоте GAM исчезают. При этом непосредственно перед переходом и во время него амплитуда GAM сначала увеличивается, а потом уменьшается практически до нуля. В режиме хорошего удержания – *H*-моду – колебания на частоте GAM не наблюдаются. При этом, в части разрядов GAM-колебания затухают примерно за 1мс до *LH*-перехода, а в других разрядах – через 1-1.5 мс после него. Время «рассогласования» – 1-1.5 мс – приблизительно соответствует длительности процесса переключения удержания при *LH*-переходе. Отмечается, что после *LH*-перехода и затухания GAM уровень фоновой турбулентности в диапазоне 50-150 кГц, также регистрируемый с помощью НВР-диагностики, остается неизменным. Обсуждаются вероятные физические причины такой динамики турбулентности, а также возможные инструментальные эффекты (нелокальность регистрации колебаний радиального электрического поля с помощью НВР-диагностики). В **параграфе 5.3** предложена модель инициирования *LH*-перехода вспышкой колебаний геодезической акустической моды. На основе численного моделирования эволюции профиля плотности плазмы, с учетом зависимости коэффициента диффузии от шира суммарного радиального электрического поля, проанализированы условия, при которых вспышка GAM способна инициировать *LH*-переход. Проведено сравнение полученных результатов с параметрами GAM, наблюдаемой в токамаке ТУМАН-3М перед *LH*-переходом. Показано, что вспышка GAM в токамаке ТУМАН-3М действительно может выступать в роли триггера *LH*-перехода. В **параграфе 5.4** суммированы основные результаты исследования геодезической акустической моды на токамаке ТУМАН-3М.

В **Заключении** сформулированы основные **результаты работы**:

В данной работе в различных режимах работы токамака ТУМАН-3М исследована взаимосвязь между электрическими полями и режимами удержания плазмы.

1. Установлена универсальная роль радиальных токов и полей в инициировании *LH*- и *HL*-переходов в токамаке. Экспериментально исследованы режимы, в которых возмущение

радиального тока по плазме возникает в результате протекания «стороннего» тока различной природы:

– переносимого запертыми электронами (режимы с магнитным сжатием/расширением и подъемом/сбросом плазменного тока);

– переносимого надтепловыми электронами (режим с интенсивной МГД-активностью);

– переносимого неудариваемыми быстрыми ионами (режим с инъекцией нагревного пучка навстречу плазменному току).

Впервые экспериментально показано, что возможность инициирования *LH*- и *HL*-переходов, независимо от природы «стороннего» тока, определяется величиной и направлением радиального тока по плазме и радиального электрического поля.

Выявлена аналогия между переключением удержания в этих режимах и *LH*- и *HL*-переходами при поляризации периферийной плазмы с помощью электрода.

2. Выяснен механизм генерации радиального электрического поля и переключения режима удержания под воздействием возмущения тороидального электрического поля при динамическом воздействии на профиль тока в токамаке: магнитном сжатии/декомпрессии и подъеме/сбросе тока по плазме. Установлено, что генерация радиального электрического поля и переключение режима удержания в этих сценариях происходит под воздействием возмущения тороидального электрического поля, влияющего на величину и направление радиального дрейфа запертых электронов. Впервые показано, что в сценариях с изменением направления тороидального электрического поля (сброс тока и магнитное расширение плазмы) поля происходит обращение радиального дрейфа, генерация положительного поля, и как следствие – выход из режима улучшенного удержания, т.е. *HL*-переход.

3. С помощью НВР-диагностики обнаружена генерация положительного радиального электрического поля величиной до 5.5кВ/м при развитии в плазме токамака МГД-неустойчивости, приводящей к образованию вращающегося магнитного острова. В результате измерений потенциала плазмы с помощью НВР-диагностики впервые показано, что это поле не локализовано на периферии, но простирается до центральных областей плазмы. Для объяснения генерации положительного радиального электрического поля привлечена модель генерации поперечного тока в плазме под воздействием потерь надтепловых электронов вдоль стохастизированных силовых линий. Впервые экспериментально продемонстрировано, что поле способно приводить к деградации удержания при развитии МГД-активности и отключению режима улучшенного удержания – *HL*-переходу.

4. Выявлены особенности механизма инициирования *LH*-перехода при инжекции нагретого атомарного пучка в направлении навстречу плазменному току. Проведено исследование эволюции радиального электрического поля и переключения режима удержания в этом режиме с использованием НВР-диагностики, электрических зондов, оптической доплеровской спектроскопии и других диагностик. Впервые обнаружено, что, несмотря на низкую эффективность столкновительной передачи энергии и импульса от пучка плазме в этом сценарии, происходит генерация отрицательного радиального электрического поля величиной до 5кВ/м и тороидального вращения плазмы по направлению инжекции со скоростью до 16км/с. Установлено, что генерации радиального электрического поля и тороидального вращения при контр-инжекции происходит в результате возникновения радиального электрического тока, переносимого неударживаемыми быстрыми ионами. С привлечением данного механизма объяснено наблюдающееся в данном режиме снижение порога по плотности для *LH*-перехода с $1.25 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до $0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

5. С помощью НВР-диагностики обнаружены и исследованы колебания потенциала плазмы на частоте порядка 30кГц, сопровождающиеся сильным возмущением радиального электрического поля, со свойствами, позволяющими идентифицировать эти колебания как геодезическую акустическую моду – GAM. Обнаружена корреляция эволюции GAM и режима удержания плазмы:

- GAM наблюдается только в *L*-моду, при плотностях плазмы $0.5\text{--}1.2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$;
- после *LH*-перехода GAM исчезает;
- при развитии интенсивных МГД-колебаний GAM подавляется.

Предложена модель инициирования *LH*-перехода под воздействием возмущения радиального электрического поля, вызванного GAM. Впервые в ходе численного моделирования эволюции профиля плотности плазмы в токамаке ТУМАН-3М определены пороговые значения параметров GAM для инициирования *LH*-перехода – амплитуды, частоты, длины волны, а также ионной температуры фоновой плазмы, и определена взаимосвязь между этими параметрами.

Таким образом, в данной работе установлена ключевая роль радиального электрического поля при переключении режима удержания плазмы в токамаке в различных сценариях и при разных механизмах генерации радиального поля. Результаты работы могут быть полезны для понимания физических основ сценариев работы термоядерных установок будущего – токамаков-реакторов и термоядерных источников нейтронов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1.** Л.Г. Аскинази, Н.Е. Богданова, В.Е. Голант, М.П. Грязневич, А.Б. Извозчиков, С.В. Лебедев, Н.В. Сахаров, К.Г. Шаховец, Исследование быстрого подъема тока в стационарной стадии разряда на установке «ТУМАН-3». // Вопросы атомной науки и техники, сер. «Термоядерный синтез». – 1988. – Вып. 3. – С. 53.
- A2.** Л.Г. Аскинази, Т.Ю. Акатова, В.Е. Голант и др., Режим омического нагрева с высокой плотностью на токамаке ТУМАН-3. // Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 52. – Вып. 3. – С. 786.
- A3.** V. E. Golant, M. V. Andrejko, **L. G. Askinazi**, V. A. Korneev, S. V. Krikunov, B. M. Lipin, S. V. Lebedev, L. S. Levin, K. A. Podushnikova, G. T. Razdobarin, V. A. Rozhansky, V. V. Rozhdestvensky, M. Tendler, A. S. Tukachinsky and S. P. Jaroshevich. Experimental results from the TUMAN 3 tokamak, ICPP 1994: International Congress on Plasma Physics, Foz do Iguacu, Brasil, 1994. // AIP Press.– 1994. – V. 345.– P. 143-149.
- A4.** Т.Ю. Акатова, **L.G. Askinazi**, S.V. Lebedev et al, Investigation of improved confinement regimes and density limit in TUMAN-3 tokamak, Proc. 13th IAEA Conf. on Plasma Phys. and Controll. Nuclear Fusion Res., Washington, 1990. // – 1990. – V. I. – P. 509
- A5.** **L.G. Askinazi**, A.I. Arbuzov, V.I. Afanas'ev et al, Ohmic H-mode in TUMAN-3 tokamak, Proc. 17th EPS Conf. on Controll. Fusion and Plasma Heating, Amsterdam, 1990. // ECA. – 1990. – V. 14B, part I. – P. 299-302.
- A6.** **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, S.V. Lebedev et al, Radial current in a tokamak caused by a biased electrode. // Nuclear Fusion. – 1992. – V. 32. – N. 2. – P. 271-277.
- A7.** **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, S.V. Lebedev et al, H-mode in the TUMAN-3 tokamak triggered by edge plasma perturbations. // Phys. Fluids B. – 1993. – V. 5. – P. 2420-2427.
- A8.** **L.G. Askinazi**, V.T. Golant, S.V. Lebedev, L.S. Levin, V.A. Rozhansky, M. Tendler, H-mode triggering by radial electric field in TUMAN-3M tokamak. // Czechoslovak Journal of Physics. 1998. – V. 48. – N. 12. – Supplement S3. – P. 47-51.
- A9.** М.В. Андрейко, **Л.Г. Аскинази**, В.Е. Голант, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Л.С. Левин, А.С. Тукачинский, Исследование предельных β в экспериментах со сбросом тока на токамаке ТУМАН-3М. // Физика плазмы.– 1999.– Т. 25.– С. 128-133
- A10.** **L.G. Askinazi**, A.V. Andreiko, V.E. Golant, V.V. Dyachenko, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, L.S. Levin, V.V. Rozhdestvensky, A.I. Smirnov, O.N. Shcherbinin, A.S. Tukachinsky and S.P. Yaroshevich. High β studies in current ramp down scenarios in tokamak

TUMAN-3M, Proc. 1998 ICPP & 25th EPS Conf. Contr. Fusion and Plasma Physics, Praha, Czech Republic, 1998. // ECA.– 1998. – V. 22C.– P. 580-583.

A11. M.V. Andrejko, **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, V.A. Kornev, S.V. Lebedev, L.S. Levin, A.S. Tukachinskij, N.A. Zhubr, Edge transport barrier evolution in current ramp down experiment in ohmic H-mode on TUMAN-3M tokamak, Proc. 26th EPS Conf. Contr. Fusion and Plasma Physics, Maastricht, Germany, 1999.// ECA.– 1999. – V. 23J.– P. 1757-1760.

A12. **L.G. Askinazi**, V.V. Bulanin, V.A. Kornev et al, Confinement bifurcation initiated by plasma current profile and toroidal electric field perturbations in the TUMAN-3M tokamak. // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2011. – V. 53. – P. 035011.

A13. **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, L.S. Levin, V.A. Rozhansky, M. Tendler, A.S. Tukachinsky, M.I. Vildjunas, S.P. Voskoboinikov, N.A. Zhubr. The H-mode transition mechanism studies using different edge plasma perturbations on the TUMAN-3M tokamak, Proc. 27th EPS Conf. Contr. Fusion and Plasma Physics, Budapest, Hungary, 2000. // ECA.– 2000. – V. 24B.– P. 520-523.

A14. M.V. Andreiko, **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, V.A. Rozhansky, V.V. Rozhdestvensky, E.A. Shevkin, A.I. Smirnov, M. Tendler, A.S. Tukachinsky, M.I. Vildjunas, S.P. Voskoboynikov, N.A. Zhubr, Confinement Bifurcations by Poloidal Magnetic Flux Perturbations in the TUMAN-3M, Proc. 29th EPS Conf. Plasma Physics and Contr. Fusion, Montreux, Switzerland, 2002. // ECA. – 2002. – V. 26B.– P. O-1.02.

A15. M.V. Andreiko, **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, N.A. Zhubr, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, L.S. Levin, G.T. Razdobarin, V.V. Rozhdestvensky, V.A. Rozhansky, A.I. Smirnov, M. Tendler, A.S. Tukachinsky, S.P. Yaroshevich. Internal transport barrier and β limit in ohmically heated plasma in TUMAN-3M, Proc. 17th IAEA Fusion Energy Conference, Yokohama, Japan, 1998. // – 1998. – P. EXP1/09.

A16. **ASKINAZI Leonid**, ANDREJKO Michael, GOLANT Victor, KORNEV Vladimir, KRIKUNOV Sergei, LEBEDEV Sergei, ROZHANSKY Vladimir, TENDLER Michael, TUKACHINSKY Alexander, VILDJUNAS Maxim, VOSKOBOINIKOV Sergei and ZHUBR Nikolai. Effects of the Toroidal Electric Field Perturbation on the Radial Electric Field and Confinement Bifurcation in the TUMAN-3M Tokamak. // J. Plasma Fusion Res. SERIES. – 2001. – V. 4. – P. 224-228.

A17. S.V. Lebedev, M.V. Andreiko, **L.G. Askinazi** et al, Experimental study of the β limit in ohmic H-mode in the TUMAN-3M tokamak. // Plasma Phys. Control. Fusion. – 1998. – V. 40. – P. 741–746.

A18. S.V. Lebedev, M.V. Andrejko, **L.G. Askinazi** et al, H-mode studies on TUMAN-3 and TUMAN-3M. // Plasma Phys. Control. Fusion. – 1996. – V. 38. – P. 1103-1105.

- A19.** M.V. Andreiko, **L.G. Askinazi**, V.E. Golant et al, Confinement bifurcation by magnetic compression on TUMAN-3, Proc. 27th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. Budapest, 12-16 June 2000. // ECA. – 2000. – V. 24B. – P. 524-527.
- A20.** M. V. Andreiko, **L. G. Askinazi**, V. V. Bulanin et al, Confinement Bifurcation by Current Density Profile Perturbation in TUMAN-3M Tokamak, Proc. 18th IAEA Fusion Energy Conference, Sorrento, 2000. // – 2000. – P. CN-77-EXP5/18.
- A21.** S.V. Lebedev, M.V. Andreiko, **L.G. Askinazi** et al, Role of Magnetic Flux Perturbations in Confinement Bifurcations in the TUMAN-3M, Proc. 19th Fusion Energy Conf., 2002, Lyon. // – 2002. – P. CN-94-EX/P1-03.
- A22.** **Л.Г. Аскинази**, В.В. Буланин, В.В. Дьяченко, и др., Исследование флуктуаций плазмы в токамаке ТУМАН-3М при различных видах перехода в H-моду. // Физика плазмы. – 2002. – Т. 28. – С. 1-9.
- A23.** **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, S.V. Lebedev, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, A.S. Tukachinsky, M.I. Vildjunas, N.A. Zhubr, Plasma potential structure nearby the magnetic island in the TUMAN-3M tokamak, Proc. 23rd EPS Conf. Plasma Physics, Tarragona, Spain, 2005. // – ECA. – 2005. – V. 29C. – P. P-5.071
- A24.** V.V. Bulanin, **L.G. Askinazi**, I.N. Chugunov et al, Influence of low-frequency MHD bursts on plasma rotation near the peripheral transport barrier in TUMAN-3M tokamak, Proc. 33rd EPS Conference on Plasma Phys. Rome, 19 - 23 June 2006. // ECA. – 2006. – V. 30I. – P. P-4.106
- A25.** **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, V.A. Kornev, et al, Radial electric field evolution in the vicinity of a rotating magnetic island in the TUMAN-3M tokamak. // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2006. – V. 48. – P. A85-A91.
- A26.** **L.G. Askinazi**, V.A. Kornev, S.V. Krikunov et al Plasma potential evolution in various operational modes in the TUMAN-3M tokamak, Proc. 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2 - 6 July 2007. // ECA. – 2007. – V. 31F. – P. P-5.092.
- A27.** **L.G. Askinazi**, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, et al, Radial electric field evolution in various operational modes in the TUMAN-3M tokamak. // Journal of Physics: Conference Series 123. – 2008. – P. 012010.
- A28.** G. Van_Oost, V.V. Bulanin, A.J. Donne, ... **L.G. Askinazi** et al, Multi-machine studies of the role of turbulence and electric fields in the establishment of improved confinement in tokamak plasmas. // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2007. – V. 49. – P. A29-A44
- A29.** S.V. Lebedev, **L.G. Askinazi**, F.V. Chernyshev, et al, Counter-NBI assisted LH transition in low density plasmas in the TUMAN-3M. // Nucl. Fusion. – 2009. – V. 49. – P. 085029.
- A30.** **L.G. Askinazi**, F.V. Chernyshev, M.A. Irzak, A.D. Komarov, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, L.I. Krupnik, S.V. Lebedev, A.D. Melnik, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, A.I. Smirnov,

A.S. Tukachinsky, M.I. Vildjunas, N.A. Zhubr. Study of NBI-caused LH transition at low density in the TUMAN-3M tokamak, Proc. 37th EPS Conf. Plasma Physics, Dublin, Ireland, 2010. // ECA. – 2010. – V. 34A. – P. P1.1005

A31. S.V. Lebedev, **L.G. Askinazi**, F.V. Chernyshev, V.E. Golant, M.A. Irzak, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, A.D. Melnik, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, A.A. Rushkevich, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinsky, M.I. Vild'junas, N.A. Zhubr. Counter-NBI Assisted LH Transition in Low Density Plasmas in the TUMAN-3M. // Proc. 22th IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, 2008. – 2008. – P. EX/P3-10

A32. S.V. Lebedev, **L.G. Askinazi**, A.G. Barsukov, F.V. Chernyshev, V.E. Golant, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, V.V. Kuznetsov, A.D. Melnik, A.A. Panasenkov, A.R. Polevoi, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, A.I. Smirnov, G.N. Tilinin, A.S. Tukachinsky, M.I. Vildjunas, N.A. Zhubr. Plasma Heating by Neutral Beam Injection in the TUMAN-3M Tokamak // Proc. 21st IAEA Fusion Energy Conference. – 2006. – P. EX/P3-15

A33. A.S. Tukachinsky, **L.G. Askinazi**, F.V. Chernyshev et al. Role of radial electric field in LH-transition triggered by counter-NBI at low plasma density in the TUMAN-3M tokamak. // PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. Series: Plasma Physics. – 2008. – V. 14. – N. 6. – P. 22-24

A34. S.V. Lebedev, **L.G. Askinazi**, Chernyshev, V.E. Golant, M.A. Irzak, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, A.D. Melnik, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, A.A. Rushkevich, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinsky, M.I. Vild'junas and N.A. Zhubr. Low Density LH Transition Triggered by Counter-NBI in the TUMAN-3M Tokamak. // Proc. 35th EPS Conf. on Plasma Phys. – Hersonissos, Greece, 2008. – ECA. – 2008. – V. 32D. – P. P-1.080

A35. **Л.Г. Аскинази**, М.И. Вильджюнас, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, А.С. Тукачинский. Радиальный ток в токамаке при инжекции нейтрального пучка. // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – Вып. 4. – С. 73-78

A36. М.И. Вильджюнас, В.А. Корнев, **Л.Г. Аскинази**, С.В. Лебедев, А.С. Тукачинский. Оптимизация геометрии ввода нагревного нейтрального пучка в токамак «ТУМАН-3М». // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – Вып. 22. – С. 80-87

A37. **L.G. Askinazi**, V.E. Golant, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, A.G. Somov, A.S. Tukachinsky, M.I. Vildjunas, N.A. Zhubr, Peripheral radial electric field evolution during the ohmic H-mode transition in the TUMAN-3M tokamak, Proc. 31st EPS Conference on Plasma Phys. London, 28 June - 2 July 2004. // ECA. – 2004. – V. 28G. – P. P-4.153.

A38. **L.G. Askinazi**, A.A. Chmyga, N.B. Dreval, V.E. Golant, S.M. Khrebtov, A.S. Komarov, V.A. Kornev, L.I. Krupnik, S.V. Lebedev, G. Van Oost, E.A. Shevkin, M. Tandler, A.S. Tukachinsky, N.A. Zhubr. First HIBP Measurement of Plasma Potential During the H-Mode Transition on the

TUMAN-3M Tokamak. // ICPP 2002: 11th International Congress on Plasma Physics.– Sidney, Australia, 2002.– AIP Press.– V. 669.– P. 171-178.

A39. L. G. Askinazi, V. A. Kornev, S. V. Lebedev, A. S. Tukachinsky, N. A. Zhubr, N. B. Dreval and L. I. Krupnik, Heavy ion beam probe development for the plasma potential measurement on the TUMAN-3M tokamak. // Rev. Sci. Instrum. – 2004. – V. 75. – P. 3517-3519.

A40. L.G.Askinazi, A.A.Chmyga, N.B.Dreval et al, Results from heavy ion beam probe diagnostics on the TUMAN-3M tokamak, Proc. 28th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. Funchal, 18-22 June 2001. // ECA. – 2001. – V. 25A. – P. 405-408.

A41. L.G. Askinazi, S.Khrebtoy, A.D. Komarov et al, GAM evolution in the H-mode discharge in the TUMAN-3M tokamak, Proc. 38th EPS Conference on Plasma Physics, Strasbourg, 2011. // ECA. – 2011. – V. 35G. – P. P1.115.

A42. Л.Г. Аскинази, М.И. Вильджюнас, Н.А. Жубр, А.Д. Комаров, В.А. Корнев, С.В. Крикунов, Л.И. Крупник, С.В. Лебедев, В.В. Рождественский, М. Tendler, А.С. Тукачинский, С.М. Хребтов, Эволюция колебаний геодезической акустической моды в разряде с омическим переходом в режим хорошего удержания в токамаке ТУМАН-3М. // Письма в ЖТФ – 2012 – Т. 38 – Вып. 6 – Стр. 29-36

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

1. Воробьев, Г. М., Горноставев С., Григорьев А. и др., Эксперименты по омическому нагреву и сжатию плазмы на токамаке «Туман-3». // Физика плазмы. – 1983. – Т. 9. – С. 105
2. F.C. Jobs, R.L. Hickok, A direct measurements of plasma space potential. // Nuclear Fusion. – 1970. – V. 10. – N. 2. – P. 195
3. Чэн, Ф. Электрические зонды. Диагностика плазмы под ред. Р. Хадлстоуна и С. Леонарда.– М.: Мир (1967): 94.
4. Буланин В.В., Лебедев С.В., Левин Л.С., Ройтерштейн В.С., Рефлектометрические исследования колебаний плазмы в токамаке Туман-3М при наклонном падении зондирующего излучения. // Физика Плазмы. – 2000. –Т.26. – С.867.
5. V Rozhansky, Understanding transport barriers through modeling. // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2004. – V. 46. – P. A1
6. H. Biglari, P.H. Diamond and P.W. Terry, Influence of sheared poloidal rotation on edge turbulence. // Phys. Fluids B. – 1990. – V. 2. – P. 1.
7. L.L. Lao, J.R. Ferron, T.S. Taylor, et al., Regimes of improved Confinement and Stability in DIII-D obtained through current profile modifications. // Proc. 14th IAEA Conf. Plasma Phys. and Control. Nucl. Fusion Res. Wuerzburg, 1992. – 1992. – V. 1. – P. 565.

8. K. Toi, K. Kawahata, S. Morita, et al., Role of Edge Magnetic Shear on the Limiter H-Mode Transition of the JIPP T-IIU Tokamak. // *Phys. Rev. Lett.* – 1990. – V. . 64 – P. 1895.
9. M. F. F. Nave, et al., in Proc. 24th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Berchtesgaden. // *ECA.* – 1997. – V. 21A. – Part I. – P. 1
10. S.J. Fielding, A.R. Field, M. Valovic, et al., The influence of MHD instabilities on the COMPASS-D H-mode threshold. // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 2000. – V. 42. – P. A191.
11. V. Rozhansky, L. Popov and S. Voskoboynikov, Modelling of internal transport barrier formation on TUMAN-3M tokamak, Proc. 25th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys Praha, 1998. // *ECA.* – 1998. – V. 22A. – P. 1876.
12. V. A. Rozhansky, S. P. Voskoboynikov and A. Yu. Popov, Radial electric field during dynamic processes in a tokamak and LH transitions. // *Plasma Physics Reports.* – 2001. – V. 27. – P. 205.
13. Haines M. and Martin P., The breaking of up–down symmetry of trapped particle orbits by a toroidal electric field. // *Phys. Plasmas.* – 1996. – V. 3. – P. 4536.
14. E. Kaveeva and V. Rozhansky, Poloidal and Toroidal Rotations near Magnetic Islands and Transport Barrier Formation, Proc. 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003. // *ECA.* – 2003. – V. 27A. – P. P-3.150.
15. В.А.Корнев, Л.Г.Аскинази, М.И.Вильджюнас и др., Возмущение электронной плотности в магнитных островах в токамаке ТУМАН-3М. // *Физ. плазмы.* – 2005. – Т. 31. – С. 867.
16. V.V. Bulanin, L.G. Askinazi, S.V. Lebedev et al, Plasma rotation evolution near the peripheral transport barrier in the presence of low-frequency MHD bursts in TUMAN-3M tokamak. // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 2006. – V. 48. – P. A101-A107.
17. E. Kaveeva, V. Rozhansky and M. Tendler, Interpretation of the observed radial electric field inversion in the TUMAN-3M tokamak during MHD activity. // *Nucl. Fusion.*– 2008. – V. 48. – P. 075003.
18. Kaganovich I. and Rozhansky V., Transverse conductivity in a braided magnetic field. // *Phys. Plasmas.* – 1998. – V. 5. – P. 3901.
19. S.Takamura, N.Ohnishi, H.Yamada et al, Electric and magnetic structure of an edge plasma in a tokamak with a helical magnetic limiter. // *Phys. Fluids.* – 1987. – V. 30. – P. 144.
20. X. Z. Yang, B. Z. Zhang, A. J. Wootton et al, The space potential in the tokamak text. // *Physics of Fluids B: Plasma Physics.* – 1991. – V. 3. – P. 3448.
21. B. Unterberg, C. Busch, M. de Bock 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. – V. 363. – P. 698–702.
22. W.R. Hesst, C. DeMichelist, M. Mattiolit et al, Experimental study of ergodic edge plasmas with marfes in Tore Supra. // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 1995. – V. 37. – P. 951.

23. N. Winsor, J. Johnson and J. Dowson, Geodesic Acoustic Waves in Hydromagnetic Systems. // *Phys. Fluids*. – 1968. – V. 11. – P. 2448.
24. P. Diamond, S-I Itoh, K Itoh and T S Hahm, Zonal flows in plasma—a review. // *Plasma Phys. Control Fusion*. – 2005. – V. 47. – P. R35–R161.
25. A. Fujisawa, T. Ido, A. Shimizu et al, Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas. // *Nucl. Fusion*. – 2007. – V. 47. – P. S718–S726.
26. A.V. Melnikov, L.G. Eliseev, V.A. Vershkov et al, Study of the geodesic acoustic induced modes in T-10 tokamak, Proc. 37th EPS Conference on Plasma Physics Dublin, Ireland, 21 - 25 June 2010. – 2010. – V. 34A. – P. P1.056.
27. V.V. Bulanin, A.V. Petrov, V.A. Rozhansky et al, Revealing of Geodesic Acoustic Mode Oscillations in TUMAN-3M Tokamak via Doppler Reflectometry, Proc. 32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, 27 June - 1 July 2005. // 2005. – V. 29C. – P. P-4.051.
28. A. Thyagaraja, F. Schwander, and K. G. McClements Rotation driven by fast ions in tokamaks // *Phys. Plasmas*. – 2007. – V. 14. – P. 112504
29. T.C. Luce, K.H. Burrell, R.J. Buttery et al, Dependence of Confinement and Stability on Variation of the External Torque in the DIII-D Tokamak, Fusion Energy. // Proc. of the 21st IAEA Conference, Chengdu, 16–21 October 2006. – 2006. – P. PD-3.
30. P Gohil, G R McKee, D Schlossberg et al, Dependence of the H-mode power threshold on toroidal plasma rotation in the DIII-D tokamak // *Journal of Physics: Conference Series* 123. – 2008. – V. 123. – P. 012017.
31. A E Hubbard, R L Boivin, J F Drake et al, Local variables affecting H-mode threshold on Alcator C-Mod, *Plasma Phys. // Control. Fusion*. – 1998. – V. 40. – P. 689.
32. T. N. Carlstrom and R. J. Groebner, Study of the conditions for spontaneous H(high)-mode transitions in DIII-D, *Phys. Plasmas*. // 1996. – V. 3. – P. 1867.
33. E Righi, D J Campbell, G D Conway et al, Comparison between experimental and theoretical conditions for the L–H transition in JET. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. – 2000. – V. 42. – P. A199–A204.