

На правах рукописи



Васильков Дмитрий Григорьевич

УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
В КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ СТЕЛЛАРАТОРЕ
ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСНОМ НАГРЕВЕ

1.3.9. Физика плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН).

Научный консультант

Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы,
д.ф.-м.н., профессор, гл.н.с. ИОФ РАН

Официальные оппоненты:

Багрянский Петр Андреевич, д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск

Красильников Анатолий Витальевич, д.ф.-м.н., директор частного учреждения ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва

Кралькина Елена Александровна, д.ф.-м.н., в.н.с. Физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Ведущая организация:

АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Защита состоится «15» апреля 2026 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.04 при ИОФ РАН по адресу: 199991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН
<https://diss.gpi.ru/all/>

Автореферат разослан « » декабря 2025 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высыпать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.223.04 Борзосеков Валентин Дмитриевич
канд. физ.-мат. наук,
тел.: +7 (499) 503-8777 доб. 2-45



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В работе представлен цикл экспериментальных и теоретических исследований, выполненных на квазистационарном (с малыми временами удержания) стеллараторе Л-2М при создании и нагреве плазмы СВЧ (микроволновым) излучением гиротронов с большим удельным энерговкладом на единицу объема плазмы до уровня мирового рекорда 4 МВт/м^3 .

Актуальность работы

Проблема освоения управляемого термоядерного синтеза остается актуальной на мировом уровне. Известны многочисленные схемы осуществления управляемых термоядерных реакций – магнитное удержание (токамаки, стеллараторы, открытые ловушки), инерциальный термоядерный синтез (пинчи, лазерный термоядерный синтез), а также альтернативные схемы, такие как, например, магнитно-инерциальный термоядерный синтез. Крупнейшим международным проектом с участием России является строящийся токамак ITER. В настоящее время основные исследования поведения термоядерной плазмы сосредоточены на крупномасштабных установках. Рассматриваются инженерно-технические проекты для реализации прототипов термоядерных электростанций (проектов DEMO) на основе токамаков и стеллараторов. Проекты направлены на достижение критерия Лоусона в основном экстенсивными методами (согласно эмпирическим закономерностям – скейлингам) путем увеличения размеров и параметров установок. Тем не менее, многие физические проблемы удержания до сих пор остаются до конца не объясненными и могут быть решены в ходе будущих экспериментов. К таким проблемам относятся связь плазменных турбулентностей с процессами переноса заряженных частиц плазмы, спонтанные динамические процессы, приводящие к увеличению энергии плазмы W , параметра β (давления плазмы, отнесенного к давлению магнитного поля) и энергетического времени жизни τ_E .

Исследования физики удержания высокотемпературной плазмы в поддержку будущих проектов могут быть проведены и на установках меньшего размера с относительно короткой продолжительностью плазменных импульсов. На них может проводиться анализ эффективности методов нагрева плазмы, к которым относятся омический, волновые и корпускулярный. В настоящее время основным методом дополнительного нагрева электронов плазмы является электронный циклотронный резонансный (ЭЦР) метод, основанный на взаимодействии СВЧ-излучения гиротронов с электронами в магнитном поле. На установке ITER планируется нагрев 24 гиротронами с суммарной мощностью 24 МВт. Существует много общего в поглощении микроволнового излучения и физике удержания плазмы в различных тороидальных установках — токамаках и стеллараторах. Основное преимущество стеллараторов по сравнению с токамаками заключается в отсутствии индукционного тока, необходимого в токамаке для создания магнитной конфигурации, но являющегося источником крупномасштабных неустойчивостей. Необходимость достижения условий для управляемого термоядерного синтеза в тороидальных установках поставила несколько принципиальных задач.

Во-первых, это достижение максимально возможной энергии высокотемпературной плазмы в условиях равновесия и устойчивости заданной магнитной конфигурации.

Во-вторых, подавление турбулентностей и, соответственно, уменьшение локальных потоков заряженных частиц и тепла для улучшения удержания плазмы.

В-третьих, выработка оптимальных сценариев плазменных разрядов с одновременным достижением максимально возможных временем жизни, концентрации и температуры.

Все эти задачи требуется решить для получения в тороидальных установках плазмы с параметрами, соответствующими критерию Лоусона.

В настоящее время в России проводится цикл исследований высокотемпературной плазмы в основном на токамаках, введен в эксплуатацию

крупнейший в России токамак Т-15МД, проводится разработка токамака-реактора ТРТ. Тороидальная установка стелларатора Л-2М является единственной установкой подобного типа в России, в которой проводятся исследования по всем трем задачам, указанным выше.

Цели и задачи работы. Основной целью данной работы является исследование удержания высокотемпературной плазмы в стеллараторе Л-2М в условиях СВЧ-нагрева с удельным энерговкладом в диапазоне $0.2\text{--}4 \text{ МВт/м}^3$.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование параметров плазмы стелларатора Л-2М, включая энергетический баланс, пространственное распределение параметров и свойства плазменной турбулентности в широком диапазоне мощностей ЭЦР-нагрева $P = 0.05\text{--}0.6 \text{ МВт}$ (соответствующие удельные мощности $P' = 0.2\text{--}2.4 \text{ МВт/м}^3$).
2. Изучение поведения плазмы в магнитной ловушке в условиях рекордного удельного ЭЦР-нагрева ($3\text{--}4 \text{ МВт/м}^3$), включая динамику, энергобаланс и взаимодействие с элементами установки Л-2М.
3. Исследование различных видов спонтанных переходных процессов в плазме стелларатора:
 - вызывающих существенную перестройку периферийной плазмы при незначительных изменениях ее глобальных параметров;
 - приводящих с значительному росту плотности n_e и энергии плазмы W .
4. Анализ процесса создания плазмы путем СВЧ пробоя водорода, закономерностей ЭЦР-нагрева, пробоя и стабилизации бестоковой высокотемпературной плазмы в широком диапазоне мощностей СВЧ нагрева и параметров плазмы.
5. Выработка оптимальных сценариев плазменных разрядов с ЭЦР-нагревом с различной временной модуляцией СВЧ-импульсов, включая импульсно-периодический режим.

6. Анализ удержания плазмы в установке Л-2М при целенаправленном варьировании магнитной конфигурации посредством генерации управляемого индукционного тока.
7. Анализ влияния неиндукционных токов на удержание плазмы.
8. Исследование возможных плазменных микронеустойчивостей с оценкой их влияния на перенос/потоки тепла и частиц, а также сопоставление экспериментально наблюдаемых характеристик переноса с предсказаниями теоретических моделей.

Научная новизна диссертационной работы в первую очередь обусловлена проведением уникальных экспериментов, в которых достигнут мировой рекордный уровень удельной мощности электронного циклотронного резонансного нагрева. Исследование было посвящено изучению удержания высокотемпературной плазмы в квазистационарном стеллараторе (время стационарного разряда ~ 10 мс) в широком диапазоне мощности СВЧ-нагрева ($P = 0.05\text{--}1$ МВт). Это соответствовало диапазону удельной мощности $P' = 0.2\text{--}4$ МВт/м³, причем область наиболее высоких значений (3–4 МВт/м³) была впервые исследована в мировой практике.

Впервые определен одномашинный энергетический скейлинг для плазмы стелларатора Л-2М в L-моде с температурой около 1 кэВ в диапазоне ЭЦР-нагрева $P = 0.05\text{--}1$ МэВ (высокая удельная мощность 0.2–4 МэВ/м³).

Впервые обнаружены спонтанные процессы перехода в режим с улучшенным удержанием энергии в плазме стелларатора Л-2М. Впервые показано, что с ростом мощности от 0.15 МВт до 0.5 МВт энергосодержание при переходе растет от 5 до 20 %.

Обнаружено, что в L-моде электростатический турбулентный поток частиц на сепараторисе имеет слоистую структуру – в радиальном направлении чередуются области с потоком, направленным наружу и внутрь плазменного шнуря. В результате L-H перехода амплитуда потока падает, а направление не меняется.

Установлено, что в рекордном диапазоне удельных мощностей ЭЦР-нагрева ($2.8\text{--}4 \text{ МВт}/\text{м}^3$) наблюдается отклонение от полученного ранее скейлинга стелларатора Л-2М, проявляющееся в ухудшении удержания плазмы по сравнению с режимами в диапазоне $0.2\text{--}2.4 \text{ МВт}/\text{м}^3$.

Выявлено, что краевая область плазмы характеризуется сложной многослойной структурой, резко трансформирующейся/меняющейся в ходе переходных процессов.

Найден оптимальный режим модуляции мощности ЭЦР-нагрева, приводящий к существенному росту энергетического времени жизни плазмы.

Экспериментально и теоретически определены условия устойчивости плазменного шнура относительно возбуждения МГД и дрейфовых мод.

Сравнительный анализ экспериментально измеренных тепловых потоков показал верность как расчетной неоклассической модели с аномальной поправкой, так и модели канонических профилей давления.

Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что физические закономерности, выявленные на стеллараторе Л-2М, могут быть использованы для достижения максимально возможной энергии высокотемпературной плазмы при ЭЦР-нагреве в различных тороидальных установках УТС. Для ныне действующих токамаков и стеллараторов (T-15МД, LHD, TJ-II, W7-X и др.) и строящегося токамака ITER важна выработка оптимальных сценариев плазменных разрядов с одновременным достижением максимально возможных значений времени жизни, концентрации и температуры.

Теоретические и экспериментальные исследования удержания плазмы без индукционного тока могут способствовать лучшему пониманию закономерностей удержания горячей плазмы, в частности поиску связей между макропараметрами плазмы, характеристиками переноса и плазменной турбулентностью для улучшения удержания плазмы.

Методология и методы исследования. Основным методом исследований является физический эксперимент, проводимый на установке – стеллараторе Л-2М с гиротронными комплексами МИГ-2 и МИГ-3. Экспериментальное исследование высокотемпературной плазмы проводилось набором различных диагностик – электромагнитных, спектроскопических, микроволновых. Для интерпретации полученных экспериментальных данных использовались методы анализа МГД-устойчивости стеллараторных конфигураций, разработанные в Отделе физики плазмы ИОФ РАН.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Достигнут новый мировой рекорд при удельной мощности электронно-циклотронного резонансного нагрева $4 \text{ МВт}/\text{м}^3$ ($1.5 \dots 4 \cdot 10^{-13} \text{ Вт на частицу}$) при концентрации плазмы $n_e = 1 \dots 2.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.
2. Для стелларатора Л-2М в диапазоне $P' = 0.2 \dots 1 \text{ МВт}/\text{м}^3$ был экспериментально получен энергетический скейлинг вида $\tau_E \sim (P/n_e)^{-0.7}$ (так называемый скейлинг Л-2М). Полученный скейлинг согласуется с международным стеллараторным скейлингом ISS95, однако его область применимости удалось расширить на значительно более высокие мощности — вплоть до рекордных $2.4 \text{ МВт}/\text{м}^3$.
2. В плазме стелларатора Л-2М в режиме ЭЦР-нагрева при концентрации плазмы выше $n_e = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ наблюдаются спонтанные переходы в режим улучшенного удержания (L-H переходы) различных видов. Если в диапазоне удельной вложенной ЭЦР-мощности $P' = 0.6 \dots 1.4 \text{ МВт}/\text{м}^3$ концентрация и время жизни увеличиваются лишь на 15% и 10% соответственно, то при $P' = 1.4 \dots 2.0 \text{ МВт}/\text{м}^3$ наблюдается скачкообразный рост — до 50% для концентрации и до 20% для времени жизни, что представляет собой рекордный прирост по сравнению с L-модой ля стелларатора Л-2М.
3. В приграничной области плазмы наблюдается изменение направления электростатического турбулентного потока частиц. После проведения боронизации непосредственно на сепараторе поток направлен в сторону стенки (по градиенту плотности), тогда как на расстоянии 1 см от сепаратора вглубь плазмы его направление меняется на противоположное — к центру

плазменного шнуря, что совпадает с направлением аномальной (баллистической) диффузии.

4. В присепаратрисной области плазмы обнаружен новый тип плазменных колебаний электромагнитной природы, обладающий дальней пространственной корреляцией между электрическим потенциалом вдоль силовой линии в разных сечениях стелларатора разнесенных вплоть до половины тора, а также между электрическим потенциалом и локальным магнитным полем.

5. Реализован сценарий нагрева, позволивший достичь на стеллараторе Л-2М рекордного энергетического времени жизни плазмы ($\tau_E \sim 7$ мс). Сценарий включает двухэтапный процесс: кратковременную (3 мс) нестационарную fazu нагрева двумя гиротронами по 200 кВт с последующим переходом в квазистационарный режим при мощности 50 кВт (отключение одного гиротрона) и плотности плазмы $n_e \sim 1.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

6. Изменение магнитной конфигурации путем возбуждения в плазме индукционного тока амплитудой $5 \text{ кA} \leq I \leq 20 \text{ кA}$ через 2 мс после включения режима ЭЦР-нагрева ($P = 200 \text{ кВт}$, $n_e \sim (0.5 \dots 2.5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$), приводит к уменьшению угла вращательного преобразования силовых линий магнитного поля в центральной области плазмы и, согласно аналитическим оценкам, к образованию магнитных островов с размером вплоть до ≈ 0.5 радиуса. Также это приводит к уплощению радиального профиля температуры и ее снижению на 30% в центральной области плазменного шнуря. Возбуждаемые в плазме стелларатора неиндукционные токи $|I| \leq 2.5 \text{ кA}$ не приводят к заметным изменениям устойчивости и равновесия плазмы

7. При удельной СВЧ мощности нагрева $P' \leq 600 \text{ кВт/м}^3$ в плазме стелларатора Л-2М реализуется квазистационарный режим. При повышении СВЧ мощности нагрева возможны переходные процессы, связанные с развитием локальных МГД неустойчивостей. При этом температурные градиентные неустойчивости, существующие на квазистационарной стадии плазмы, влияют только на рост переноса частиц и энергии.

8. Сравнительный анализ экспериментально измеренных тепловых потоков показал верность как расчетной неоклассической модели с аномальной поправкой, так и модели канонических профилей давления.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается высоким уровнем экспериментальной техники, применением современных методов обработки при анализе данных, использованием базы данных, включающей тысячи импульсов, и хорошим совпадением результатов, полученных экспериментальными и аналитическими методами, а также согласием с опубликованными данными, представленными в научно-технической литературе.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы обсуждались на научных семинарах ИОФ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», НИЯУ «МИФИ», Физфака МГУ им. М.В. Ломоносова. Материалы, изложенные в диссертации, были представлены в 79 докладах на следующих научных конференциях: XXXIV-LI Международные (Звенигородские) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2005-2024 гг.); 15th Intern. Stellarator Workshop (Madrid, Spain, 2005); 21st IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu, China, 2006); 17 International Toki Conferences on Plasma Flows and Turbulence in Plasmas and 16 Intern. Stellarator Workshop (Toki, Gifu, Japan, 2007); 22nd IAEA Fusion Energy Conference (Geneva, Switzerland, 2008); 20th International Toki Conference “The Next Twenty Years in Plasma and Fusion Science” (Toki-city, Japan, 2010); 59 научно-техническая конференция МИРЭА (Москва, 2010); VII Российская конференция “Современные средства диагностики плазмы и их применение” (Москва, НИЯУ МИФИ, 2012); Первая Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем" (Москва, 2013); 41st EPS Conference on Plasma Physics (Berlin, Germany, 2014); 20th Intern. Stellarator-Heliotron Workshop (Greifswald, Germany, 2015); 42nd EPS Conference on Plasma Physics (Lisbon, Portugal, 2015); 43rd EPS Conference on Plasma Physics (Leuven, Belgium, 2016); 45th EPS Conference on Plasma (Prague,

Czech Republic, 2018); VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2020» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2020); 19th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation; (Moscow, GPI RAS, 2023).

Публикации. Основные научные результаты диссертационного исследования представлены в 30 статьях в рецензируемых журналах. Из них 26 статей опубликованы в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК, при этом 25 статей индексируются в Web of Science (WOS), а 28 — в Scopus. В 9 статьях диссертант является первым автором.

Личный вклад автора. Диссертация является результатом 20-летнего труда автора в ИОФ РАН и представляет собой обобщение работ автора, выполненных на установке Л-2М с мощным СВЧ нагревом плазмы в режиме ЭЦР, реализованном с помощью гиротронных комплексов МИГ-2 и МИГ-3 совместно с сотрудниками ИОФ РАН. Цели и задачи диссертационного исследования ставились лично автором или при его определяющем участии. Автор принимал непосредственное участие в планировании и проведении экспериментов, обработке полученных результатов, их интерпретации, а также в проведении аналитических расчетов устойчивости плазменной конфигурации. Анализ, обобщение результатов и формулирование выводов работы проводились лично автором. Основные исследования выполнены в соавторстве с проф. Щепетовым С.В., Федяниным О.И. Харчевым Н.К. и Хольновым Ю.В., а также с сотрудниками ИОФ РАН Борзосековым В.Д., Вафиным И.Ю., Гребенщиковым С.Е., Гришиной И.А., Ивановым В.А., Летуновым А.А., проф. Скворцовой Н.Н., Степахиным В.Д. Теоретический анализ физики СВЧ-пробоя (раздел 6.2) для проводившихся экспериментов выполнен Терещенко М.А. Работа установки Л-2М обеспечивалась Мещеряковым А.И. и его сотрудниками, а работа гиротронных комплексов МИГ-2 и МИГ-3 — коллективом под руководством проф. Батанова Г.М. и Сарксяна К.А.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем

диссертации составляет 344 страницы, включая 122 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 327 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, сформулированы цель, задачи исследований и основные научные положения диссертационной работы, новизна и практическая ценность полученных в диссертации результатов. Кратко изложено содержание работы по главам.

В первой главе излагается история и физические предпосылки удержания плазмы в магнитных ловушках. Дан обзор физики удержания плазмы в токамаках и стеллараторах, принципов равновесия и устойчивости плазменной конфигурации, экспериментально наблюдавшихся переходных процессов. Раздел 1.1.1 посвящен физике удержания плазмы в токамаках. Раздел 1.1.2 посвящен особенностям удержания плазмы в стеллараторах – магнитогидродинамическому (МГД) равновесию и устойчивости трехмерной конфигурации и влиянию других специфических проблем. Далее дается краткий обзор процессов переноса в плазме магнитных ловушек: классических, неоклассических и аномальных (1.1.3). В разделе 1.2 дан обзор основных неустойчивостей в плазме замкнутых магнитных ловушек: крупномасштабные МГД неустойчивости, связанные с давлением (1.2.1) и током (1.2.2) в плазме, в том числе неиндукционным (1.2.3). Излагаются особенности мелкомасштабных неустойчивостей – пилинг-мод (1.2.4) и кинетических неустойчивостей и их влияние на турбулентность плазмы и аномальный перенос (1.2.5). Параграф 1.2.6 посвящен влиянию примесей и взаимодействия плазмы со стенками на характеристики удержания. В разделе 1.3 дается краткое представление о скейлингах энергобаланса в токамаках и стеллараторах. Раздел 1.4 посвящен динамическим переходным процессам в режим улучшения или ухудшения удержания плазмы в токамаках и стеллараторах (1.4.1). Также (1.4.2) излагаются вопросы трансформации периферийной плазмы при транспортных

переходах, изменения турбулентного потока и возбуждения низкочастотных периферийных мод в данной области.

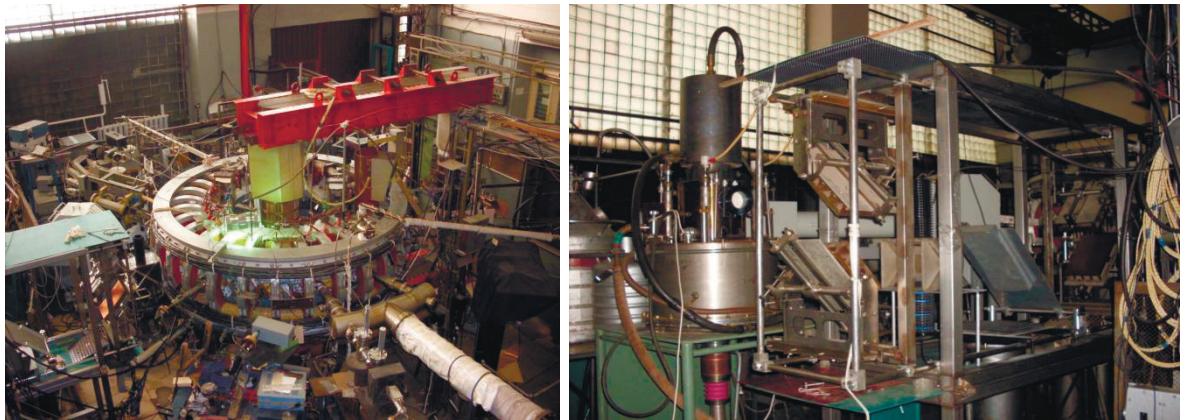


Рисунок 1. Внешний вид stellarатора Л-2М (слева) и гиротрона с квазиоптическим трактом (справа).

Во второй главе дается описание stellarаторов серии Ливень, диагностические схемы, физика удержания – равновесие и устойчивость плазменного шнуря и особенности переноса. В разделе 2.1 дается экскурс в историю исследований на stellarаторах в ФИАН/ИОФРАН, излагаются технические характеристики и устройство stellarаторов Ливень, Л-2 и подробно установки Л-2М (2.2). На рис. 1 представлен внешний вид установки, гиротрона и квазиоптического тракта, на рис. 2 – структура магнитных полей.

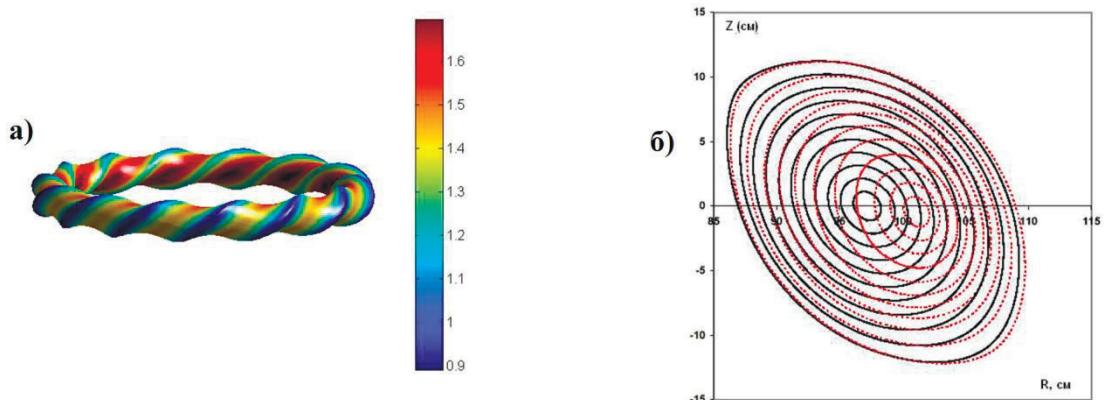


Рисунок 2. а) Общий вид равновесной плазменной конфигурации Л-2М. Цвета соответствуют значению магнитного поля в Тл. Расчет соответствует $\beta = 1$. б) Поперечное сечение магнитных поверхностей в случае вакуума (сплошные линии) и в присутствии плазмы (пунктирные линии).

В разделе 2.3 дается описание диагностического комплекса Л-2М. Подробно дается описание комбинированной диамагнитной диагностики (2.3.1) и системы ленгмюровских и магнитных зондов (2.3.2). Также в параграфах

2.3.3 и 2.3.4 дается краткий обзор диагностик излучения в мягком рентгеновском, СВЧ (циклотронное) и оптическом диапазоне для определения профилей электронной температуры и интерферометрические (микроволновые и лазерные) диагностики для анализа распределения плотности в объеме шнура.

Раздел 2.4 посвящен модели удержания плазмы в магнитных полях. В центральной области плазмы идеальные МГД-моды стабилизированы за счет магнитной ямы, а в периферийной области за счет большого шира, однако возможно развитие резистивных МГД-неустойчивостей. В разделе 2.5 излагается транспортная модель на основе неоклассического переноса с учетом аномальных эффектов, а также применение модели канонических профилей давления [A28].

В третьей главе излагается принцип электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева с помощью СВЧ-излучения, его особенности на различных установках, проблемы, а также конфигурации гиротронных комплексов стеллараторов Л-2 и Л-2М. Установка Л-2М обладает рекордно высокой удельной мощностью ЭЦР-нагрева (табл. 1).

Название установки	Объем камеры, м ³	Мощность ЭЦР-нагрева, МВт	Частота ЭЦР-нагрева, ГГц	Удельный энерговклад ЭЦН, МВт/м ³
Стеллараторы				
W7-X (Германия)	30	10	140	0.33
Л-2М (Россия)	0.25	1	75	4
TJ-II (Испания)	1	1.2	53	1.2
Токамаки				
	AUG (США)	12	8	105/140
TCV (Швейцария)	2	6	82/126	3
T-10 (Россия)	2.7	3	129/140	1.11
FTU (Италия)	1.6	1.6	140	1
WEST (Франция)	15	0.7	118	0.05
Токамаки в разработке				
T-15МД (Россия)	20	8	83/105	0.4
JT-60SA (Япония)	130	7	110/138	0.05
ITER (Франция)	840	24	170	0.03

Таблица 1. Сводные характеристики ЭЦР-нагрева на токамаках и стеллараторах

В разделе 3.1 кратко излагаются физические основы микроволнового нагрева. В разделе 3.2 дается представление о возможности генерации токов и пробоя (инициации разряда) в тороидальных ловушках с помощью СВЧ-импульсов. В разделе 3.3 дается описание гиротронных комплексов серии МИГ, с помощью которых поэтапно проводились эксперименты по ЭЦР-нагреву плазмы в стеллараторах серии Ливень. Постепенно повышалась мощность нагрева (с 50 кВт до 1 МВт), разрабатывались и применялись различные сценарии разряда с временной модуляцией импульсов СВЧ.

В четвертой главе излагаются экспериментальные результаты, полученные с гиротронным комплексом МИГ-2 и при генерации индукционного тока.

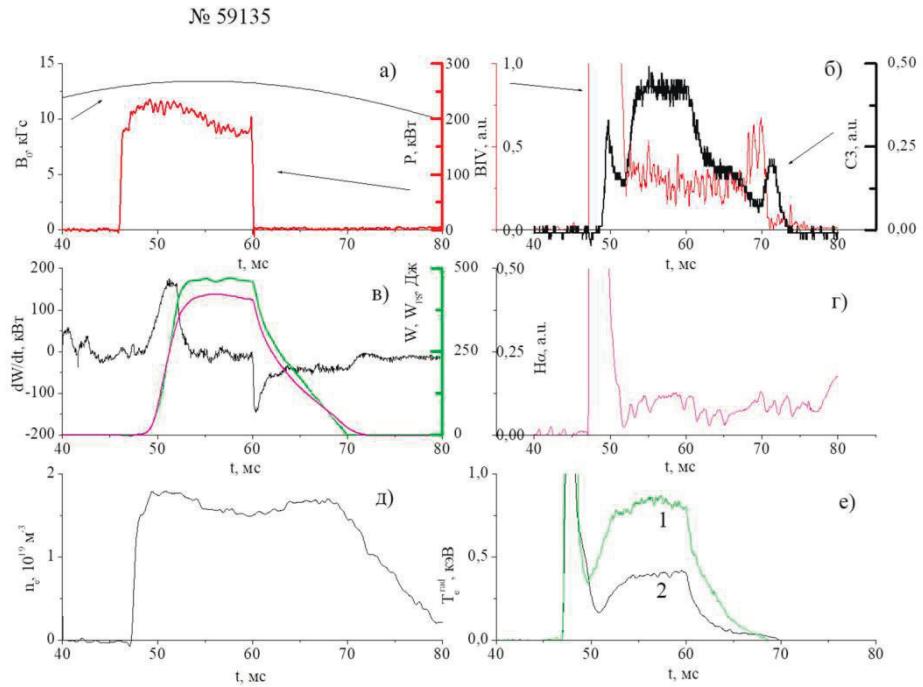


Рисунок 3. Временная эволюция основных параметров плазменного импульса при ЭЦР-нагреве: а) тороидальное магнитное поле на оси системы B_0 и мощность ЭЦР-нагрева P ; б) интенсивность излучения $B4$ и $C3$; в) производная диамагнитного сигнала dW/dt , энергия плазмы W и энергия плазмы, определенная методом измерения полей токов Пфирша–Шлютера W_{PS} ; г) интенсивность излучения Ha , д) электронная плотность n_e , усредненная по центральной хорде, е) электронная температура T_e^{rad} , определенная методом измерения электронно-циклотронного излучения соответственно в центре (1) и на 0.5 радиуса (2) .

В параграфе 4.1 описывается стандартный плазменный разряд при одном прямоугольном импульсе ЭЦР-нагрева и эволюция основных макропараметров (рис. 3). На рис. 4 представлены характерные пространственные распределения

T_e и n_e . [A3, A8]. Импульсы в активной фазе нагрева характеризуются параболическим профилем T_e и немонотонным с провалом в центре профилем n_e , подверженного сильному эффекту выноса плотности из центра (“ripmp-out”), не подавленному в отсутствие индукционного тока [A3, A5]. Наблюдаемый эффект значительного расширения профиля распределения мощности в экспериментах по ЭЦР-нагреву интерпретируется как одно из следствий низкопороговой параметрической неустойчивости затухания волны накачки, приводящей к возбуждению ионных и электронных волн Бернштейна.

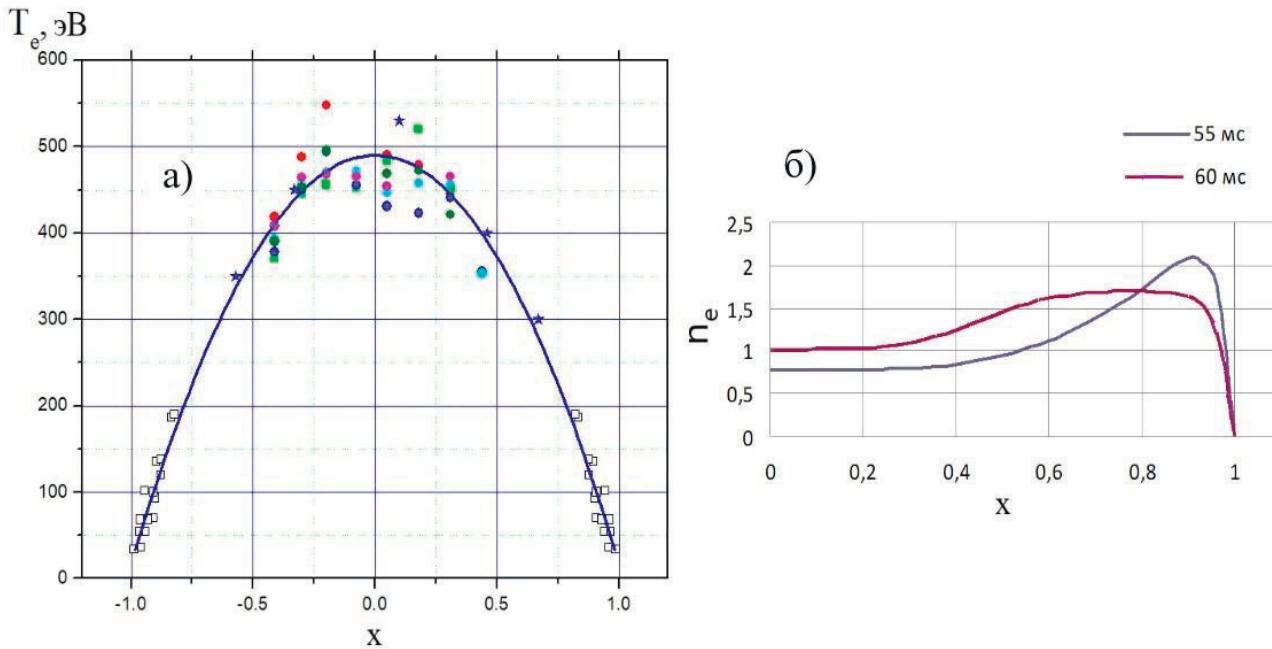


Рисунок 4. а) Сводное радиальное распределение электронной температуры по данным диагностик рентгеновского (кружки), циклотронного (звезды) и видимого (квадраты) излучения. б) Распределение электронной плотности, 10^{19} м^{-3} , по данным лазерной интерферометрии на 55 и 60 мс.

В параграфе 4.1.2 описывается анализ базы данных, полученных в диапазоне мощности нагрева $P = 50\text{--}250$ кВт и электронной плотности $n_e = (0.5\text{--}3) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Анализ энергобаланса плазмы в стеллараторе Л-2М, проведенный для ЭЦР нагрева плазмы в условиях пониженного вследствие боронизации уровня радиационных потерь, показал, что база данных хорошо описывается скейлингом $W = W_0 n_e^{\alpha_n} P^{\alpha_P} \mu^{\alpha_\mu}$ (рис. 5), созданным по аналогии с Международным стеллараторным скейлингом ISS95 $W^{\text{ISS95}} = 0.079 \alpha^{2.21} R^{0.65} B^{0.83} \mu_{2/3}^{0.4} n_e^{0.51} P^{0.41}$. Однако в условиях Л-2М зависимость несколько отличается от скейлинга ISS95: показатель степени плотности плазмы $\alpha_n \geq 0.75$ для скейлинга

L-2M и $\alpha_n = 0.51$ для ISS95 [A1]. После расширения базы данных на область с $250 \text{ кВт} < P < 600 \text{ кВт}$ формула скейлинга получила вид $\tau_E \sim (P/n_e)^{-0.7}$.

В разделе 4.1.2 обсуждается влияние на удержание структуры стеллараторного магнитного поля, изменяемого переключением системы питания. Установлено, что влияние вращательного преобразования μ также существенно сильнее (показатель степени μ для $\alpha_\mu \geq 0.77$ для W05 и $\alpha_\mu = 0.4$ для ISS95).

В разделе 4.1.4 представлен анализ свободного распада плазмы. Он показывает малое изменение энергозапаса плазмы по сравнению со стационарной фазой ЭЦР-нагрева, что указывает на слабое влияние механизма ЭЦР-нагрева на теплоперенос плазмы.

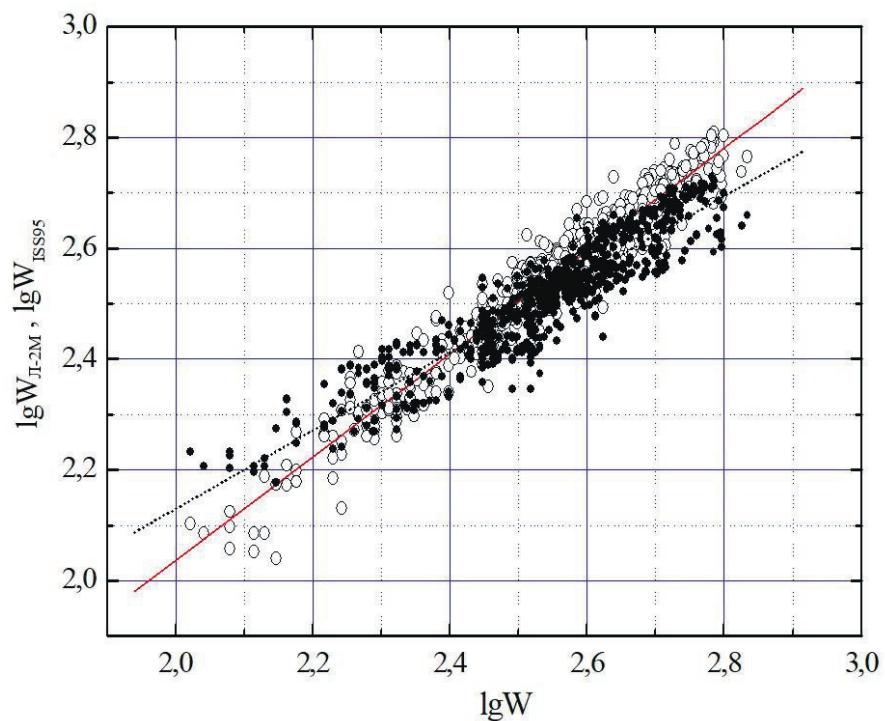


Рисунок 5. Сравнение функциональных зависимостей $W_{\text{L-2M}}$ и W_{ISS95} от экспериментально измеренной энергии плазмы W ; белые кружки - $\lg W_{\text{L-2M}}$, черные кружки - $\lg W_{\text{ISS95}}$.

В разделе 4.3 излагаются эксперименты в режиме одновременного ЭЦР и омического нагрева при возбуждении “отрицательного” индукционного тока, уменьшающего исходный угол μ по абсолютной величине. Амплитуды индукционных токов позволяли получать в пределах плазменного шнуря поверхности с нулевым значением μ и, соответственно, области с различными

знаками μ . Численный анализ магнитной структуры (4.3.3) продемонстрировал возникновение многоосевой магнитной конфигурации с магнитными островами, размер которых достигает 0.5 среднего радиуса плазмы (рис. 6).

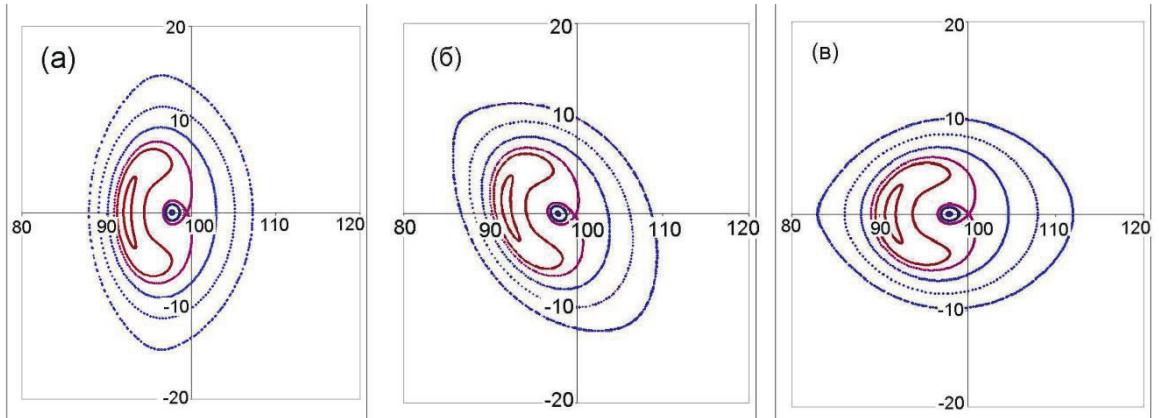


Рисунок 6. Расчетная структура магнитных поверхностей в трех разных сечениях стелларатора при «отрицательном» индукционном токе $I = 7$ кА.

Установлены эффекты вспышечного возмущения токов Пфирша–Шлютера и изменения модового состава МГД-возмущений (возбуждение МГД-флуктуаций с тороидальным числом $n = 0$) при наличии нулевого μ . Данные эффекты зарегистрированы при $I > 10$ кА. При возбуждении индукционного тока наблюдается падение T_e на 30% от значения в бестоковом режиме во внутренних областях плазмы и сохранение барьера температуры в присепаратрисной области (рис. 7). Зарегистрировано также изменение радиального профиля n_e и ее временной эволюции: образование менее плоских профилей в режимах с током во внутренних областях, понижение градиента концентрации в присепаратрисной области и уменьшение n_e в центральных областях на 1/3.

Эти данные свидетельствуют об усилении процессов переноса тепла во внутренних областях и переноса частиц на периферии. Также при возбуждении индукционного тока данные доплеровской рефлектометрии говорят о возникновении радиального ширина полоидальной скорости [A2]. Однако, несмотря на усиление процессов переноса и изменение характеристик турбулентности, установлено, что возбуждение в магнитной конфигурации Л-

2M многоосевой структуры с магнитными островами не вызывает значительного усиления процессов переноса.

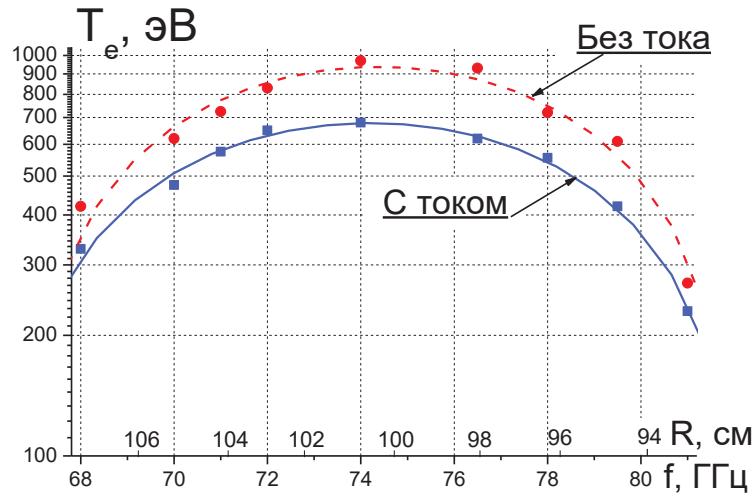


Рисунок 7. Распределение температуры электронов во внутренней области плазменного шнура в бестоковом режиме и в режиме с «отрицательным» током 13–15 кА. Средняя плотность без тока $1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, с током $1,5 \div 1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

В разделе 4.3.2 приводится анализ сигналов осциллирующих магнитных полей, создаваемых плазменными токами вне плазменного шнура в разрядах, где использовался ЭЦР-нагрев и с задержкой индукционный ток. Обнаружено, что отрицательный ток снижает амплитуду магнитных флуктуаций за счет увеличения ширины только при малых значениях ($|I| \sim 6 \text{ кА}$). При увеличении $|I|$ средний уровень магнитных флуктуаций на стационарной части разряда растет [A11].

Проведен анализ условий появления аксиально-симметричных возмущений. Подобные возмущения с $m \neq 0$ не наблюдаются при $|I| \leq 8 \text{ кА}$, они возникают в некоторых разрядах при $|I| = 9 \text{ кА}$, а при $|I| \geq 10 \text{ кА}$ осцилляции наблюдаются в каждом разряде. Их частота оказывается порядка 10 кГц, полоидальное волновое число $m = 2$ и длительность 4–6 мс. При этом в диапазоне $5 \leq |I| \leq 16 \text{ кА}$ не было найдено аксиально-симметричных возмущений с $m = 1$. Отсутствие осцилляций с $m = 1$ и малая величина внешнего магнитного поля для возмущения $m = 2$ приводит к выводу, что магнитный остров в радиальном направлении оказывается субсантиметрового

размера, что в свою очередь заставляет предположить, что профиль плазменного тока при увеличении $|I|$ меняется. Когерентных трехмерных мод (например, тиринг-мод), которые могут сопровождать быстрое проникновение тока в плазму, не наблюдается.

В разделе 4.4. приводятся результаты экспериментальных измерений токов равновесия, возникающих в плазме стелларатора Л-2М при создании и нагреве плазмы в режиме ЭЦР на второй гармонике электронной циклотронной частоты. Продольные тороидальные токи равновесия (так называемые бутстреп токи) и токи, возникающие при ЭЦР-нагреве (токи увлечения), измерялись с помощью пояса Роговского, охватывающего все поперечное сечение плазмы. Токи, протекающие в противоположных направлениях снаружи и внутри тора (так называемые токи Пфирша–Шлютера), измерялись с помощью обмоток поперечного магнитного поля.

Обнаружено, что наличие в конструкции стелларатора железного трансформатора омического нагрева существенно влияет на временное развитие токов равновесия вследствие значительной индуктивности плазменного шнура. Эксперименты с закороткой первичной обмотки трансформатора и, соответственно, с уменьшением его индуктивности позволили существенно увеличить регистрируемые продольные токи в плазме стелларатора. Однако небольшая общая длительность импульса магнитного поля стелларатора не дала возможности достигнуть момента выхода продольных токов на стационарные значения даже при максимально возможной в нашем случае длительности СВЧ-импульса 20 мс и измерить максимальные значения продольных тороидальных токов в плазме стелларатора Л-2М при мощности ЭЦР-нагрева 500 кВт и средней плотности плазмы $n_e \approx 1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Максимальный наблюдавшийся ток достиг значения 2.5 кА, выполненные оценки максимально возможного тока при его выходе на стационарное значение дают 6–7 кА. Сравнение экспериментальных результатов с соответствующими теоретическими оценками указывает на то,

что в нашем случае СВЧ-нагрева плазмы в режиме ЭЦР токи увлечения и бутстреп токи суммировались [A22].

В пятой главе представлены исследования различных спонтанных переходных процессов, приводящих к существенному изменению свойств плазмы и турбулентности. Переходы наблюдаются при превышении порогового значения мощности нагрева и интерпретированы как переходы в режим улучшенного удержания (L–H переходы) с формированием краевого транспортного барьера.

В разделе 5.1 описываются быстрые транспортные переходы (БТП). Они наблюдаются при превышении порогового значения $P \geq 150$ кВт и имеют сходство с переходами в режим улучшенного удержания (L–H переходами) с формированием краевого транспортного барьера. Обнаружено, что после переходного процесса меняется краевая структура электрического поля и условия взаимодействия периферийной плазмы со стенками вакуумной камеры. Эволюция макропараметров плазмы в импульсе с БТП представлена на рис. 8.

Каждый БТП идентифицируется по спонтанному быстрому ($\Delta t \leq 200$ мс) падению dW/dt , зарегистрированному диамагнитными измерениями. После этого энергия плазмы быстро восстанавливает свое значение, а затем монотонно увеличивается до конца активной фазы нагрева (так же, как и средняя плотность плазмы n_e). Общая длительность переходного процесса составляет порядка 0.5 мс.

Существенные изменения наблюдаются в области, близкой к границе плазмы при $0.85 < x < 1.0$ ($x = a/a_p$; a_p – радиус сепаратрисы, a – средний радиус магнитной поверхности), где согласно расчету расположены две рациональные магнитные поверхности низкого порядка с μ , принимающим значения $2/3$ и $3/4$. Относительные значения флуктуаций параметров плазмы и ширина их спектров в этой области значительно уменьшаются (рис. 9) [A4].

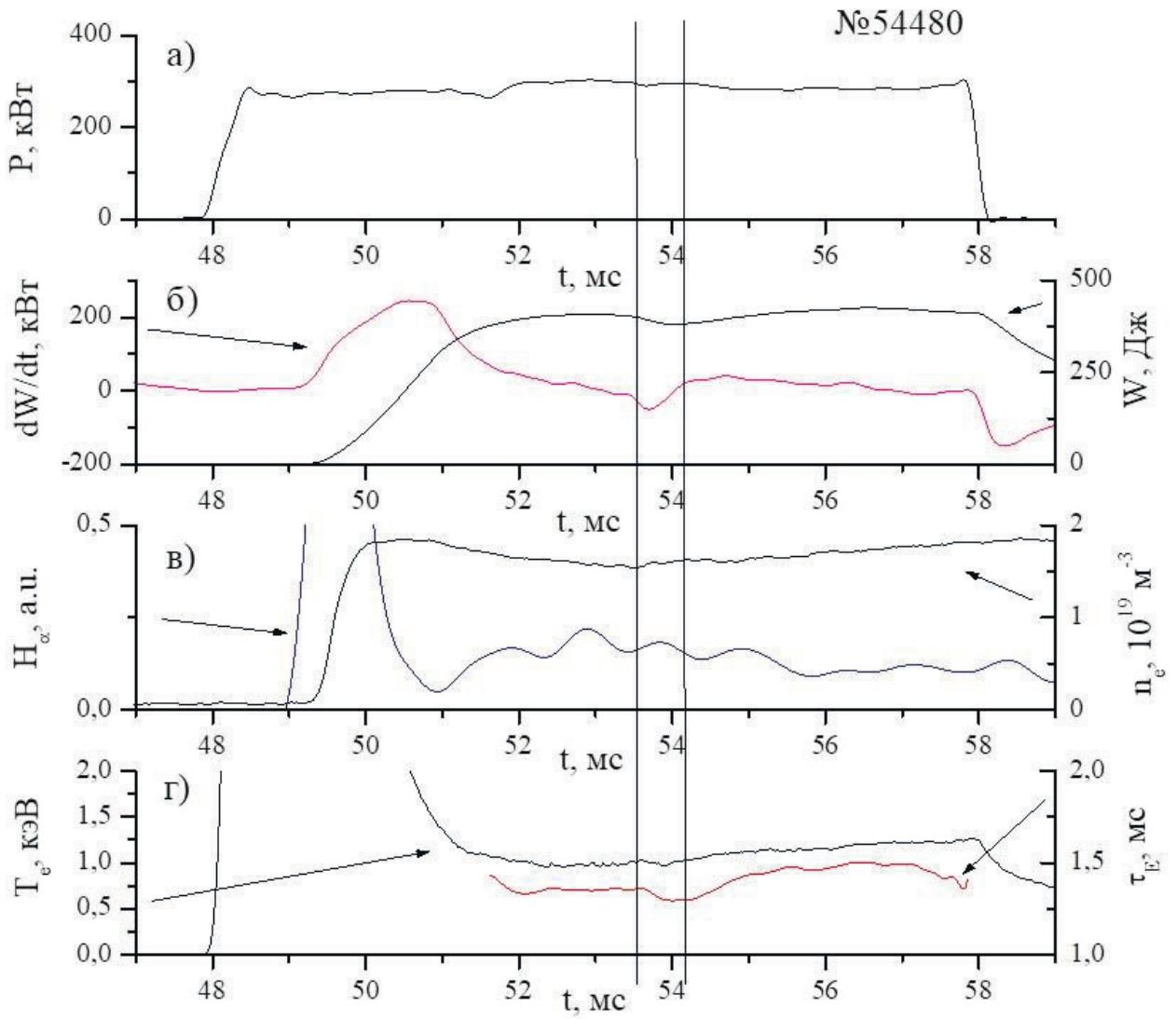


Рисунок 8. Осциллограммы характерного импульса с БТП: а) мощность ЭЦР-нагрева P ; б) диамагнитный сигнал dW/dt (левая ось) и энергосодержание плазмы W (правая ось); в) интенсивность излучения H_α (левая ось) и средняя электронная плотность n_e (правая ось); г) электронная температура T_e (левая ось) и энергетическое время жизни τ_e (правая ось). Вертикальными линиями указан временной диапазон перехода.

Область имеет четко выраженную многослойную структуру. Обнаружено, что быстрая потеря энергии плазмы происходит в ближайшей к границе плазмы меньшей зоне, и параметры плазмы не восстанавливают там свои прежние значения до конца разряда. В остальной области наблюдаются резкие изменения значения плавающего потенциала V_f . В зоне между положениями рациональных магнитных поверхностей с μ , равными $2/3$ и $3/4$, V_f резко падает с началом перехода и восстанавливается до значения меньше начального после небольшой задержки по отношению к концу активной фазы нагрева. Переходы появляются только при достаточно высоких значениях n_e , а при заданном

значении n_e – только при больших значениях P . Самые высокие значения W при P и n_e были достигнуты в разрядах, в которых происходили переходные процессы.

В разделе 5.2 излагается исследование турбулентного потока с помощью системы ленгмюровских зондов. Обнаружено, что направление среднего турбулентного потока различно на разных радиусах вблизи края плазмы.

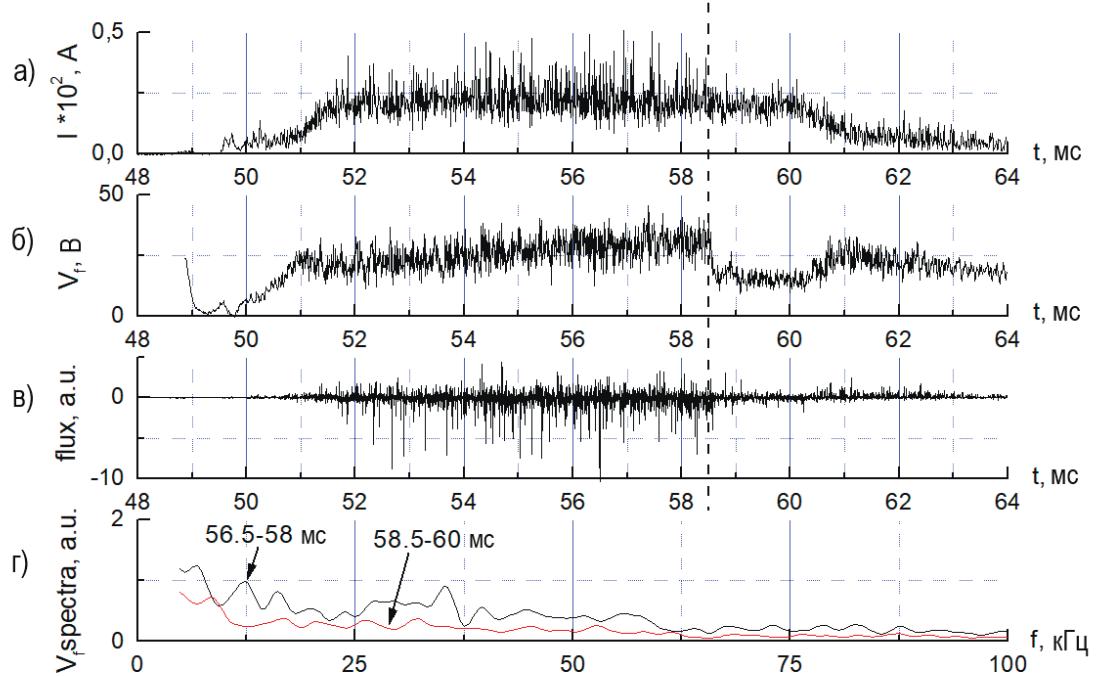


Рисунок 9. Данные с ленгмюровского зонда (положение 0.6 см вглубь от сепаратрисы, $x = 0.947$): а) ионный ток насыщения I_{sat} , б) плавающий потенциал V_f , в) турбулентный поток частиц Γ , г) Фурье-спектр V_f до и после БТП. Пунктир соответствует моменту БТП согласно диамагнитным измерениям.

Нормальная компонента электростатического потока частиц определялся как $\Gamma = \delta I_{\text{sat}} \Delta V_f / l \Delta \theta$, где l – расстояние между электродами зонда, θ – полоидальный угол на магнитной поверхности. Поток направлен наружу в области, лежащей между сепаратрисой и рациональной магнитной поверхностью с $\mu = 3/4$. В области, лежащей между поверхностями с $\mu = 3/4$ и $\mu = 2/3$, поток меняет свое направление; в данной области на протяжении стадии ЭЦР-нагрева он направлен внутрь. В областях, лежащих ближе к центру плазмы, также наблюдаются изменения направления потока. Во всех рассмотренных случаях в области, где турбулентный поток направлен внутрь,

присутствуют симметричные электромагнитные колебания в диапазоне частот 1–3 кГц [A6].

После БТП турбулентный поток падает по амплитуде, но сохраняет свое направление. Область существования симметричной низкочастотной моды расширяется после перехода в зону между упомянутыми выше рациональными магнитными поверхностями. Существует верхний порог по n_e , выше которого явление обращенного потока не наблюдается. Радиальный профиль потенциала имеет уплощение в области низко-рациональных магнитных поверхностей, а профиль I_{sat} и n_e монотонный, что говорит об отсутствии в присепаратрисной области магнитных островов (рис. 10).

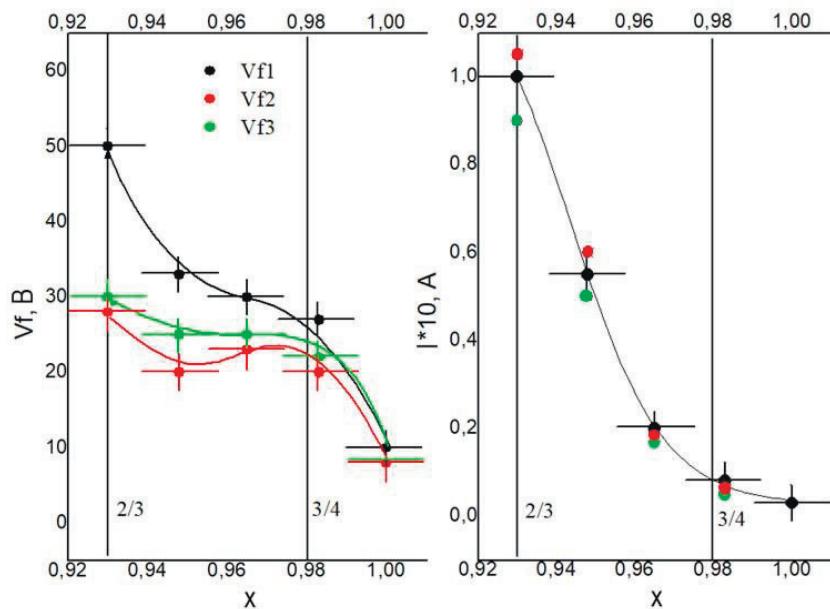


Рисунок 10. Радиальная структура зондовых характеристик: V_f (слева) и I_{sat} (справа) в импульсах с БТП. Красные линии соответствуют значениям до перехода, красные – после, зеленые – после выключения ЭЦР-нагрева.

В зависимости от местоположения зонда средний турбулентный поток зависит от различных спектральных составляющих V_f и I_{sat} . При этом плазма с положительным потоком обладает заметно большей энергией. Экспериментально измеренный турбулентный поток не может служить эффективным инструментом количественного анализа переноса плазмы, но может быть использован (будучи нелинейным по природе) в качестве качественного индикатора изменения состояния.

В разделе 5.3 излагается исследование дальних пространственных корреляций в краевой плазме и их связи с геометрией магнитных поверхностей. Обнаружено, что до БТП существует два диапазона частот, где существуют дальние пространственные корреляции, а именно, высокочастотный $f \sim 30$ кГц и низкочастотный $f \sim 1-3$ кГц (рис. 11). После транспортного перехода дальние пространственные корреляции наблюдаются в диапазонах $f \sim 1-3$ кГц и $f \sim 6-10$ кГц. Во всех диапазонах частот, где наблюдаются дальние пространственные корреляции, возмущения представляют собой сложные нелинейные образования. Возмущения в этих диапазонах электромагнитны, то есть корреляция между потенциалом электрического поля и магнитным полем велика.

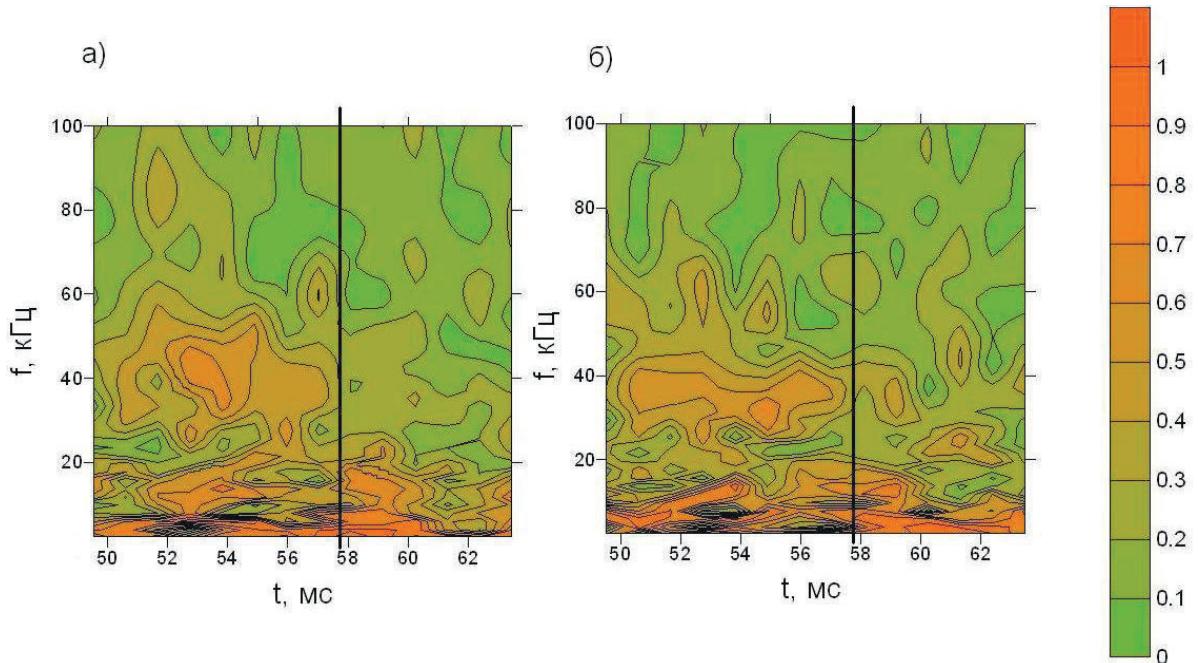


Рисунок 11. а) Вейвлет-когерентность между V_{ver} и сигналом магнитного зонда $d\tilde{B}/dt$. б) Когерентность между двумя ленгмюровскими зондами (δV_{up} δV_{ver}).

Обнаружено, что после перехода в диапазоне $f \sim 6-10$ кГц возбуждается трехмерное локализованное возмущение с характерной частотой геодезической акустической моды (ГАМ). В качестве причины появления дальних пространственных корреляций можно указать изменение электрического поля в результате БТП.

Отдельно исследовались дальние пространственные корреляции в наиболее низкочастотной области. Показано, что низкочастотные глобальные

электромагнитные возмущения с частотой $f \sim 1$ кГц обычно присутствуют как до, так и после БТП. Их основой является возмущение с $m = n = 0$, обладающее тороидальными сателлитами. Из-за малой тороидальности ($a_p/R = 0.115$) сателлиты также малы и быстро спадают с ростом m . Поэтому на практике заметным может быть лишь $m = 1, n = 0$. Важно отметить, что возмущение $m = n = 0$ в рамках идеальной магнитной гидродинамики является электростатическим. Можно предположить, что наличие как геометрических сателлитов, так и диссипативных эффектов приводит к появлению магнитного поля, которое и регистрируется в эксперименте [A10].

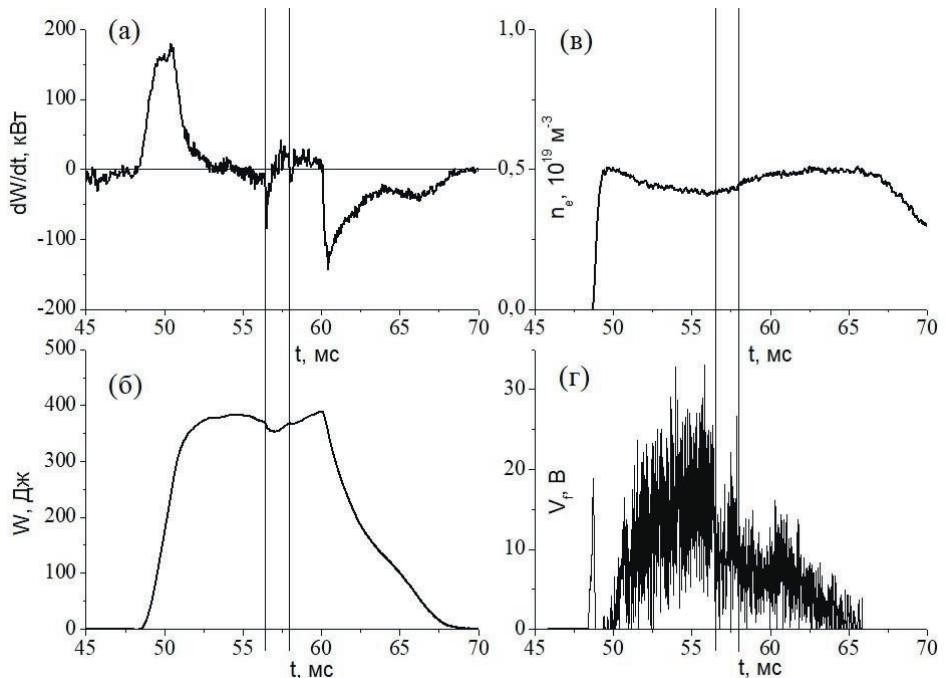


Рисунок 12. Осциллограммы плазменного разряда с двумя вспышками пилинг-моды. Вертикальными линиями отмечены моменты сбросов энергии.

В разделе 5.4 излагается модель пилинг-моды в качестве триггера БТП. Была аналитически решена задача о пилинг-моде в плазме, устойчивой относительно критерия Мерсье с магнитным бугром на краю плазменного шнуря. Показано, что при корректном учете вакуумной области внутренние пилинг-моды оказываются устойчивыми, а у внешней моды появляется порог по градиенту давления. Показано, что расчеты соответствуют экспериментальным данным. При малом давлении плазмы пилинг-моды безопасны для удержания плазмы, в силу этого их роль в транспортном переходе ограничивается ролью триггера. Возбуждение подобной моды может

служить диагностическим целям и свидетельствовать о том, что градиент давления на краю плазменного шнуря превзошел некоторое пороговое значение [A15]. В некоторых разрядах наблюдалась парная пилинг-мода, сопровождавшаяся двумя сбросами dW/dt (рис. 12).

В разделе 5.5 анализируется модовая структура электромагнитных возмущений в краевой области плазмы. При БТП в плазме происходит трансформация мод – до перехода наблюдается высокая когерентность в диапазоне частот 20–40 кГц, после перехода она появляется на частотах 80–110 кГц. На краю плазмы наблюдаются МГД-моды $m/n = 2/1, 3/2, 4/3$; в ходе разряда частотная и пространственная структура мод меняется. Установлено, что разряд характеризуется положительным потенциалом V_f , что соответствует положительному плазменному потенциалу V_p , при БТП наблюдается уменьшение амплитуды V_f . Наблюданная до перехода высокая когерентность между \tilde{B} и V_f , а также между сигналами V_f с разных зондов позволяют предположить, что до перехода токи, возбуждаемые на крайних рациональных магнитных поверхностях в диапазоне частот $f \sim 20\text{--}40$ кГц, усиливают флуктуации плазмы, что приводит к уходу электронов и к положительному V_p . Уменьшение турбулентности после перехода приводит к уменьшению ухода электронов, то есть падению положительного потенциала. Поскольку положительный V_p означает преимущественный по сравнению с ионами уход электронов, после перехода возможно два эффекта: улучшение удержания электронов и резкие потери ионов на краю. Если улучшение удержания электронов может быть связано с уменьшением флуктуаций, то быстрый уход ионов может быть связан с эффектом взаимодействия плазмы со стенкой [A24].

В разделе 5.6 представлены исследования электромагнитной моды с характерной частотой 70–90 кГц, имеющей пороги по плотности и давлению плазмы (рис. 13). Неустойчивое возмущение вращается в сторону ионного диамагнитного дрейфа. Неустойчивость наблюдалась при $n_e > 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $\langle \beta \rangle > 0.14\%$. Данные возмущения регистрируются по флуктуациям на сигналах магнитных зондов, которые возрастают при увеличении среднего давления, что

укладывается в рамки теории беспороговых резистивных перестановочных мод [A17]. Подавление моды приводит к L-H переходу.

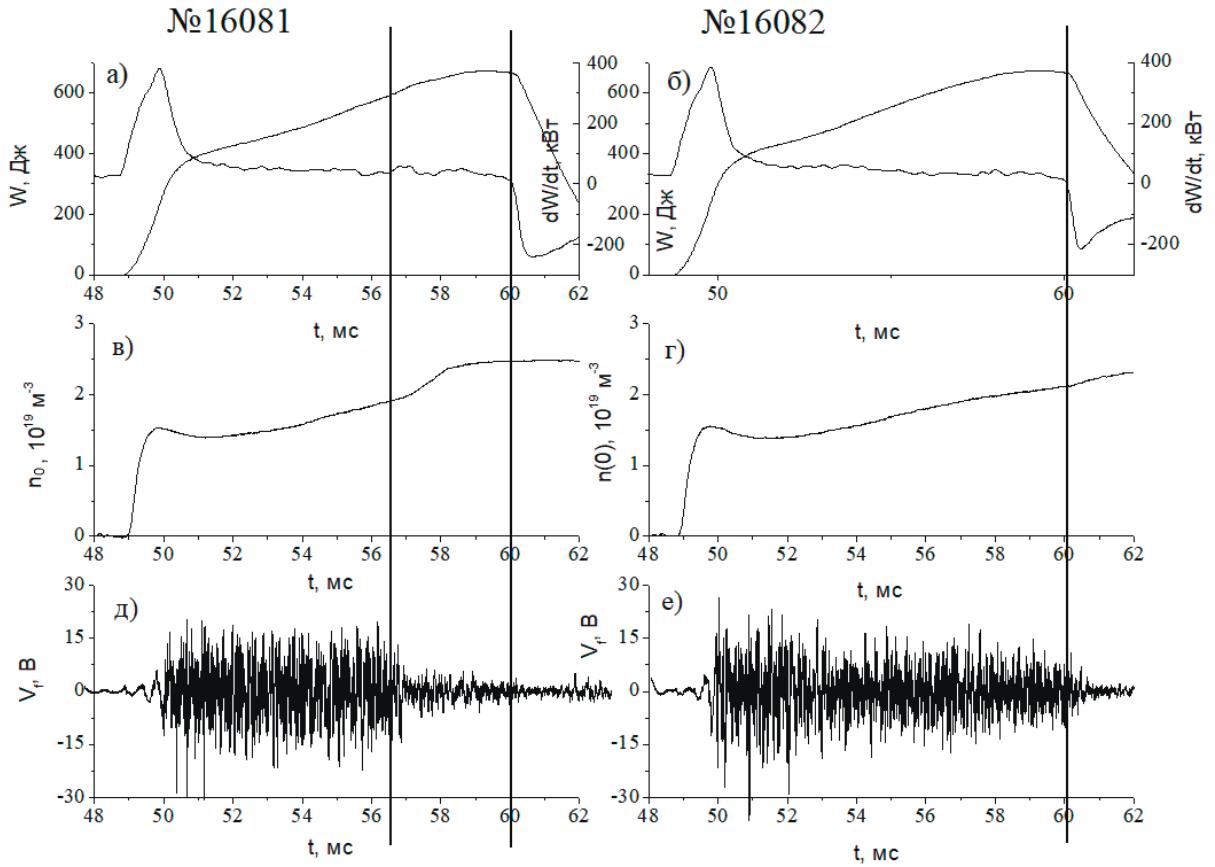


Рисунок 13. Параметры импульсов с возбуждением электромагнитной моды (слева) и без (справа): (а, б) энергия плазмы W и сигнал диамагнитной диагностики dW/dt ; (в, г) средняя плотность плазмы n_e ; (д, е) осциллирующая компонента V_f . Вертикальные линии указывают моменты перехода и выключения нагрева.

В разделе 5.7 представлены результаты экспериментов по ЭЦР-нагреву плазмы при $P = 200\text{--}500$ кВт (удельная мощность $0.8\text{--}2$ МВт/м³). Наблюдались спонтанные транспортные переходы, которые приводили к увеличению плотности и энергии плазмы (рис. 14). При мощности, превышающей 400 кВт, наблюдается скачкообразное увеличение плотности и энергии. При мощности 500 кВт был получен режим, в котором в момент перехода W и β динамически увеличиваются на 20%, несмотря на охлаждение плазмы [A29].

В шестой главе представлены исследования по оптимизации сценариев плазменных разрядов с возможностью достижения максимальных параметров плазмы в установке Л-2М. В первом разделе излагаются результаты экспериментов после замены гиротронного комплекса на более мощную

систему МИГ-3, во втором обсуждается вопрос ЭЦР-пробоя в плазме с различными условиями старта разряда и излагается феноменологическая модель стабилизации плазменного шнуря.

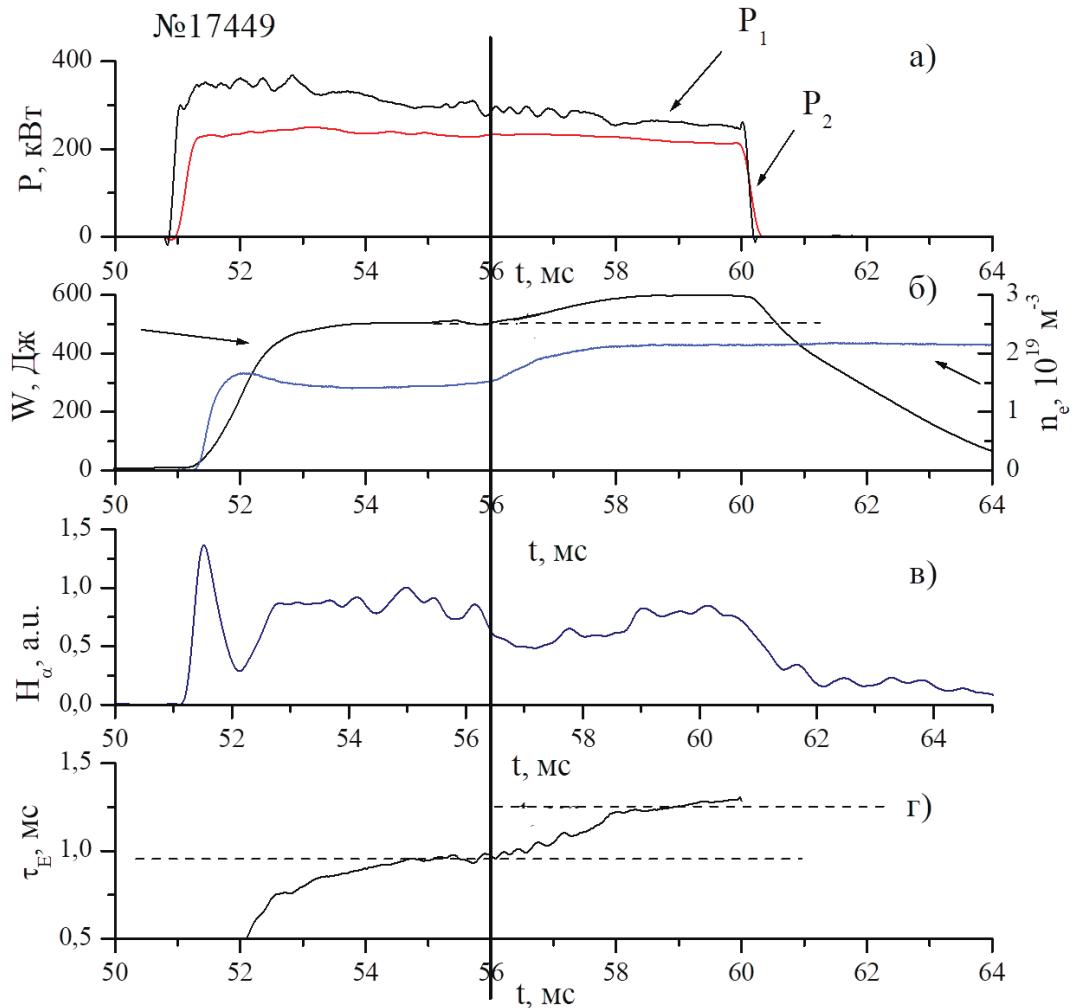


Рисунок 14. Временная эволюция параметров плазмы в импульсе с L-H переходом при $P = 500$ кВт: (а) мощности первого (P_1) и второго (P_2) гиротронов; (б) энергосодержание W (левая ось) и средняя электронная плотность n_e (правая ось); (в) интенсивность излучения H_α ; (г) энергетическое время жизни τ_E .

Далее обсуждаются вопросы временной модуляции СВЧ-импульса и возможность нагрева предварительно ионизованной плазмы. Также обсуждаются эксперименты с различными сценариями импульсно-периодического нагрева. Наконец, представлены результаты при максимальной достигнутой мощности СВЧ-нагрева (1 МВт) и сопоставление с результатами, полученными при меньших значениях мощности.

В разделе 6.1. обобщаются результаты, полученные на стеллараторе Л-2М с использованием гиротронного комплекса МИГ-3 без индукционного тока на

второй гармонике гирочастоты (75 ГГц) в диапазоне плотностей мощности нагрева от 0.38 до 1.5 МВт/м³. Осциллограммы характерных разрядов с прямоугольным импульсом МИГ-3 представлены на рис. 15.

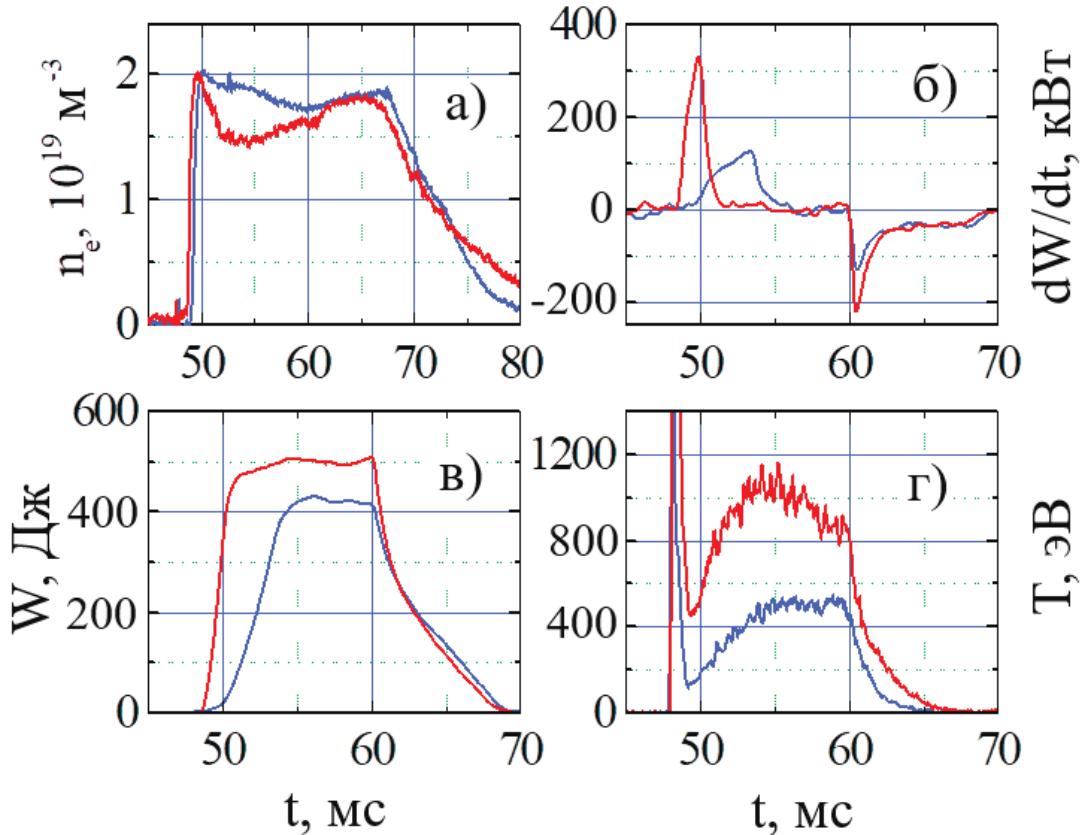


Рисунок 16. Основные параметры импульсов с гиротронным комплексом МИГ-3: а) n_e , б) dW/dt , в) W , д) T_e в центре плазменного шнуря. Синие кривые – поглощенная мощность 130 кВт, красные кривые – 360 кВт.

Установлено, что в пределах статистического разброса экспериментальных данных по диамагнетизму плазмы наблюдаемое увеличение энергии при $P = 0.3\text{--}0.7$ МВт согласуется с численными расчетами неоклассических потерь с учетом локально захваченных частиц и аномальных потерь при теплопереносе. Как видно из данных на рис. 16, разброс экспериментальных значений энергии плазмы относительно расчетных кривых составляет не более 20–25%.

Следует отметить, что в диапазоне мощностей СВЧ-излучения и плотностей плазмы, используемых в экспериментах, запертые электроны могут играть значительную роль в процессах теплопроводности. Из-за шафрановского сдвига магнитной оси наружу более чем на 3 см их роль может возрасти по сравнению с моделью, используемой в расчетах. Это обстоятельство, например,

может объяснить тот факт, что значения электронной температуры, измеренные в эксперименте, ниже, чем предсказанные моделью [A7].

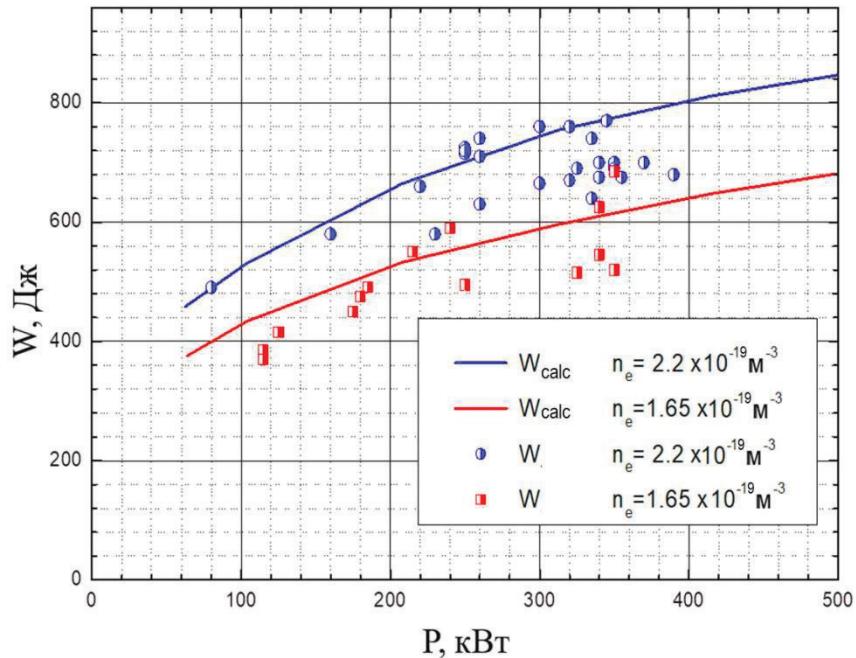


Рисунок 16. Значения энергии плазмы в зависимости от мощности нагрева. Расчетные значения (линии) и экспериментальные (точки) для двух значений n_e .

В разделе 6.2 изложены теоретические и экспериментальные исследования пробоя плазмы с помощью ЭЦР-нагрева в стеллараторе на 2-й гармонике гирочастоты. Бесстолкновительная усредненная по времени динамика электронов в микроволновом поле на частоте, близкой ко 2-й гармонике ЭЦР, была проанализирована для магнитного поля, характерного для стеллараторов. В частности, были сделаны теоретические оценки, которые сравнивались с экспериментальными результатами стелларатора Л-2М.

Уравнения решались численно и аналитически. Анализ показал, что существуют четыре группы электронов, которые сильно различаются по амплитуде энергетических отклонений, и что все они представляют практический интерес для пробоя. Определены границы этих групп в 2D конфигурационном пространстве и показано, что в установке Л-2М электроны, которые подвергаются наиболее интенсивным энергетическим колебаниям (группа нелинейного режима), сосредоточены в непосредственной близости от магнитной оси.

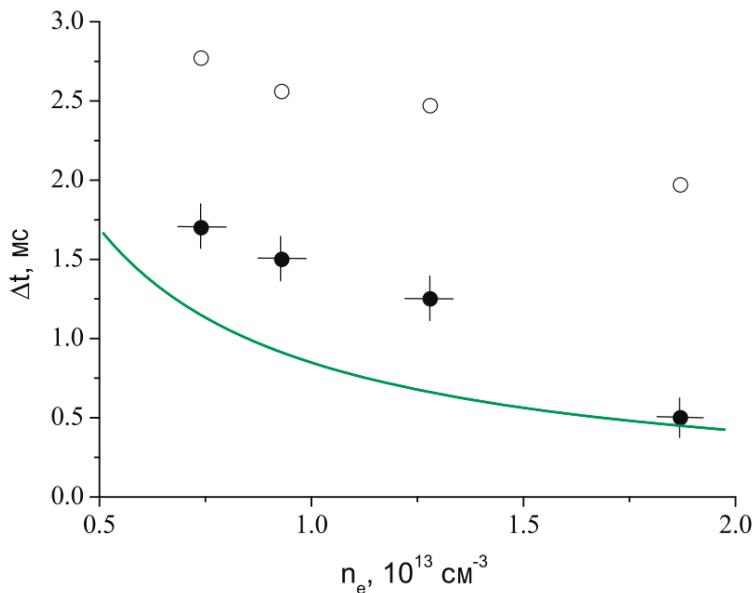


Рисунок 17. Усредненное время достижения максимальной плотности n_e (белые кружки) и 1% от максимальной n_e (черные кружки), в зависимости от максимальной n_e . Рабочий газ – водород, $P = 250$ кВт. Зеленая кривая – расчетные значения времени достижения.

Одна из групп электронов также способна создавать электронную лавину вблизи магнитной оси, и оказалось, что она достаточно устойчива к изменению магнитного поля. Одновременно и почти с одинаковой скоростью электроны этой группы возбуждают нейтральные частицы, которые далее свободно перемещаются через магнитное поле и ионизируются при большинстве столкновений с электронами всех групп, поскольку требуемая энергия легко достижима для всех электронов внутри вакуумной камеры. Таким образом, пробой распространяется по магнитным поверхностям, и его скорость зависит главным образом от средней кинетической энергии нейтралов. Предложена простая аналитическая оценка времени задержки пробоя, которая достаточно хорошо согласуется с экспериментальными результатами Л-2М (рис. 17). Модель, используемая в этой работе, может применяться для описания предварительной ионизации в различных термоядерных установках [A18].

В разделе 6.3 представлен анализ характерных особенностей перехода плазмы в стационарную стадию удержания. Начальная стадия разряда, инициированного мощным СВЧ-импульсом в режиме ЭЦР-нагрева, характеризуется быстрым (от 100 мкс) ростом потерь, наблюдаемым на

диамагнитном сигнале dW/dt и приводящим к стабилизации плазменного шнуря (рис. 18).

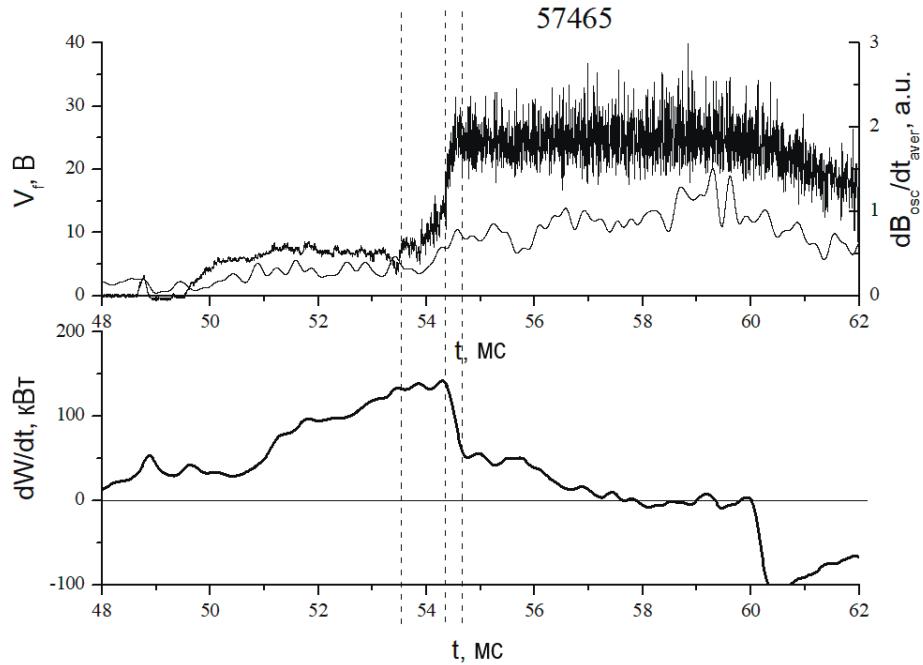


Рисунок 18. Эволюция V_f , усредненного по времени модуля сигнала dB_{osc}/dt и dW/dt ; $\delta x = 0.4$ см.

Обнаружено, что свойства данного процесса при неизменной мощности СВЧ-нагрева существенно различаются для различных значений n_e . Обнаружено, что некоторые элементы стабилизации плазменного шнуря укладываются в принципы классической термодинамики. При неизменной n_e время стабилизации плазмы тем меньше, чем выше P ; при неизменной P , процесс тем медленнее, чем выше n_e . Обнаружено, что данный процесс связан с первую очередь с явлениями, происходящими в краевой области плазмы, в которой расположен стохастический слой магнитных поверхностей. Предполагается, что после СВЧ-пробоя нагрев плазменного шнуря в центральной области осуществляется за счет теплопроводности, а в области вне реальной сепаратрисы, при появлении конвективных и диффузационных потерь, dW/dt принимает значение, близкое к нулевому. В результате переходного процесса усиливается взаимодействие приграничной плазмы со стенками вакуумной камеры, что приводит к установлению стационарной стадии плазменного разряда. Возможно, влияние на процесс стабилизации оказывают локальные МГД-неустойчивости, возникающие в стохастическом слое, однако

количественно оценить их влияние на параметры переноса на данном этапе не представляется возможным [A23].

В разделе 6.4 рассматривается возможность увеличения параметров плазмы (W , β) с помощью модуляции СВЧ-импульсов. Схема управления гиротронным комплексом МИГ-3 позволяла задавать различные временные сценарии работы обоих гиротронов как для нагрева плазмы в стеллараторе, так и для технологических экспериментов. Одним из сценариев был временной сдвиг запуска гиротронов друг относительно друга; первый гиротрон при фиксированной мощности служил для ионизации и первичного нагрева плазмы, второй обеспечивал стационарный разряд длительностью 10 мс. Продемонстрировано, что, варьируя мощность второго гиротрона в диапазоне 200–50 кВт, есть возможность увеличить время жизни до 4 раз при снижении мощности второго гиротрона до 50 кВт. Достигнутое в данном режиме значение энергетического времени жизни $\tau_E = 7$ мс является рекордным для установки Л-2М (рис. 20) [A27].

На стеллараторе Л-2М продемонстрирована возможность получения плазмы в импульсно-периодическом режиме в условиях электронно-циклотронного резонанса (раздел 6.4.3). Использовались различные режимы временной модуляции гиротронного излучения, при этом менялась длительность СВЧ-импульсов и пауз в одном плазменном разряде (рис. 19). Число импульсов в разряде варьировалось от 2 до 5, длительность импульсов – от 1 до 4 мс, длительность пауз – от 2 до 6 мс; P составляла 300–400 кВт. Для представленных режимов были измерены все основные макро- и микропараметры плазмы. Основное внимание уделялось изучению энергобаланса, поведению радиальных профилей электронной плотности и электронной концентрации и характеристикам пристеночной плазмы. На рис. 20 представлен разряд с 2-мя импульсами СВЧ.

Обнаружено, что во время пауз температура в краевой области спадает до значений $T_e < 100$ эВ, при включении же гиротрона снова резко возрастает на всех радиусах. Средняя плотность меняется мало, в центре наблюдается

падение плотности (эффект pump-out) в момент нагрева, во время пауз профиль выполняется.

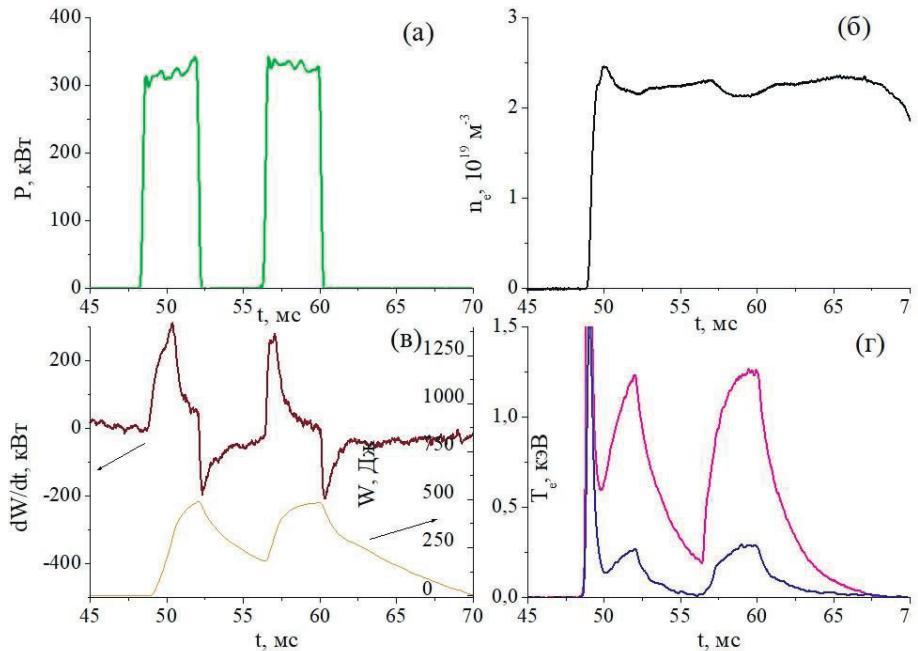


Рисунок 19. Временная эволюция основных параметров разряда в импульсно-периодическом режиме (2 импульса СВЧ): а) мощность ЭЦР-нагрева; б) средняя плотность n_e ; в) сигнал диамагнитной диагностики dW/dt и энергия плазмы W ; г) электронная температура T_e в центре (розовая кривая) и на 0.7 радиуса (синяя кривая).

В краевой же области, наоборот, во время нагрева электронная плотность растет, что связано, по-видимому, с усилением взаимодействия краевой плазмы со стенками вакуумной камеры и дополнительным поступлением водорода и примесей со стенок. Быстрое падение сигнала dW/dt (наблюдаемое также в режимах одиночных СВЧ-импульсов) коррелирует с ростом потенциала на ленгмюровском зонде и ростом температуры на всем радиусе плазмы. Данный эффект, видимо, связан с ростом конвективных и диффузионных потерь в данный момент времени, причем этот механизм ограничивает рост энергосодержания плазмы и фактически определяет его максимальное значение при соответствующих значениях n_e и P [A21].

Раздел 6.5 посвящен экспериментам с максимальными достигнутыми значениями мощности нагрева $P = 0.5\text{--}1$ МВт. В диапазоне $P = 0.5\text{--}0.6$ МВт энергетическое время жизни τ_E в целом соответствует одномашинному

скейлингу Л-2М, в то время как в импульсах с мощностью в диапазоне 0.7–1 МВт τ_E снижается на 10–15% относительно скейлинга Л-2М (рис. 21).

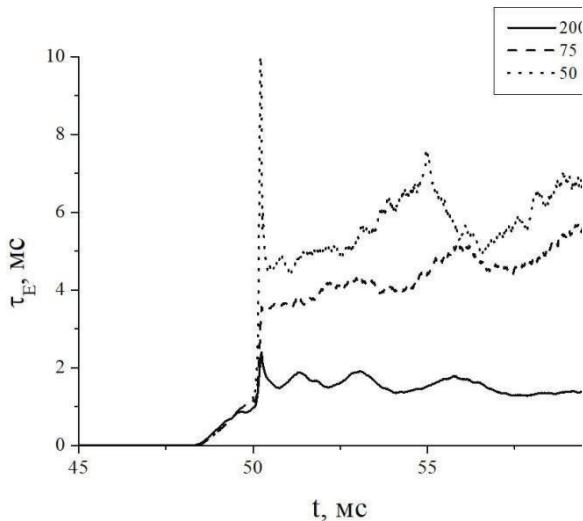


Рисунок 20. Эволюция τ_E для мощностей первого СВЧ-импульса 200 кВт и поддерживающих разряд СВЧ-импульсов гиротрона 75 и 50 кВт.

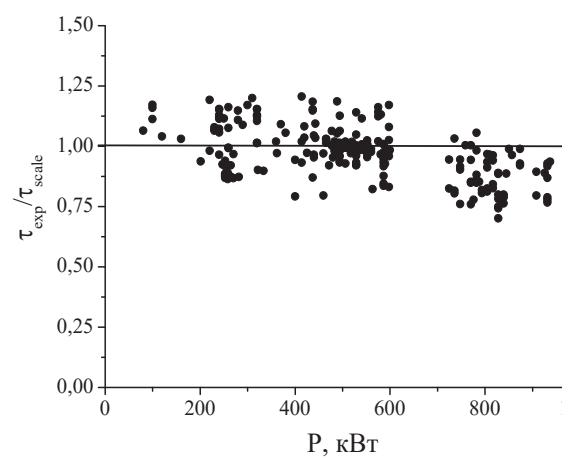


Рисунок 21. Отношение экспериментально измеренного τ_{exp} к рассчитанному τ_{scale} в зависимости от мощности нагрева P .

Тепловая нагрузка на вакуумную камеру распределена неравномерно, достигая максимального значения на винтовой сепараторе 0.5 МВт/м², причем импульсное воздействие вызывает окисление материала стенки, возможно образование униполярных микродуг и поступление в плазму элементов бороуглеродной смеси и запертого водорода, что приводит к накоплению и перераспределению примесей в плазменном шнуре [A25].

В седьмой главе рассматривается динамика плазменного импульса и роль турбулентности. В разделе 7.1 приводится сравнительный анализ эволюции макро- и микропараметров плазмы при спонтанных и вынужденных переходных процессах в плазме стелларатора. Спонтанные переходные процессы наблюдаются при постоянной мощности нагрева, а вынужденные инициированы скачкообразно растущей или убывающей мощностью нагрева (рис. 22). Проводится поиск связи эволюции макропараметров плазмы (в первую очередь энергетического времени жизни) с параметрами плазменной турбулентности.

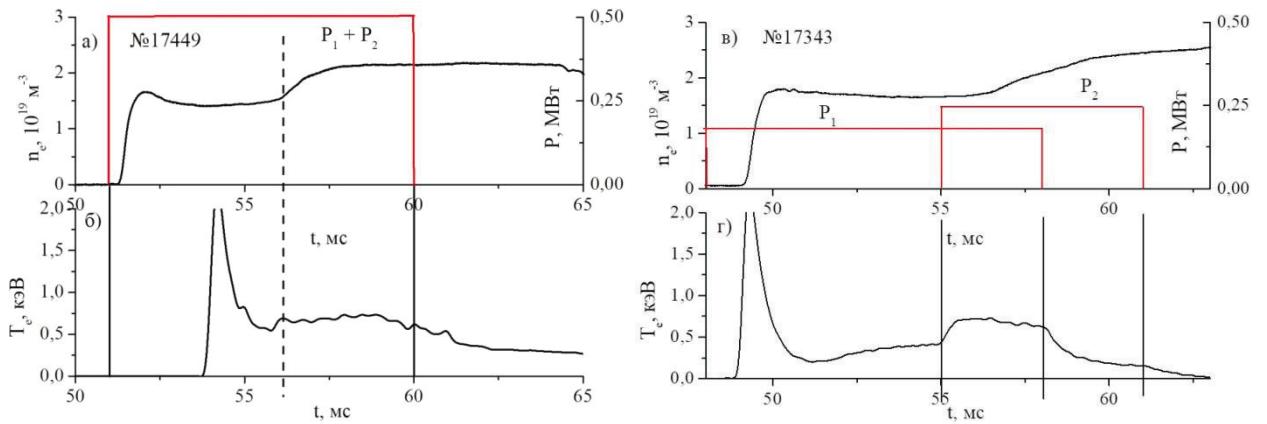


Рисунок 22. Временная эволюция средней электронной плотности n_e (слева) и центральной электронной температуры T_e (справа) для трех выбранных режимов: а, б) спонтанный переходный процесс; в, г) модулированное увеличение мощности; Сценарий ЭЦР-нагрева указан красными линиями. Пунктирная линия соответствует моменту спонтанного переходного процесса.

Приводятся физические модели явлений, определяющих динамические изменения макропараметров плазмы (7.2). Анализ данных высокочастотных диагностик позволяет выявить влияние МГД и кинетических неустойчивостей на переходные процессы в горячей плазме стелларатора, а также роль взаимодействия плазмы со стенками вакуумной камеры. Сравнительный анализ эволюции макро- и микропараметров плазмы при спонтанных и вынужденных переходных процессах выявил характерные частоты различных МГД и кинетических неустойчивостей [A31].

В разделе 7.3 излагается анализ сдвигов фазы между флюктуациями V_f и I_{sat} в краевой плазме. Обнаружено, что средний сдвиг фаз между флюктуациями Ω имеет широкий диапазон значений $\pi \geq \Omega \geq 0$, постепенно уменьшаясь при движении зонда вглубь плазмы от $\Omega \sim \pi$ на магнитной поверхности, ближайшей к сепаратору, до $\Omega \sim 0$ в наиболее глубокой области измерений (рис. 23).

$\Omega \sim 0$ считается типичным для электростатических дрейфовых неустойчивостей; $\Omega \approx \pi/2$ соответствует ГАМ или магнитогидродинамической (МГД) диссипативной перестановочной неустойчивости.

Предполагается, что сдвиг фаз $\Omega \approx \pi$ также может указывать на нелокальность процесса, то есть то, что в данной точке пространства колебания

являются вынужденными и определяются в основном процессами, локализованными вне точки наблюдения.

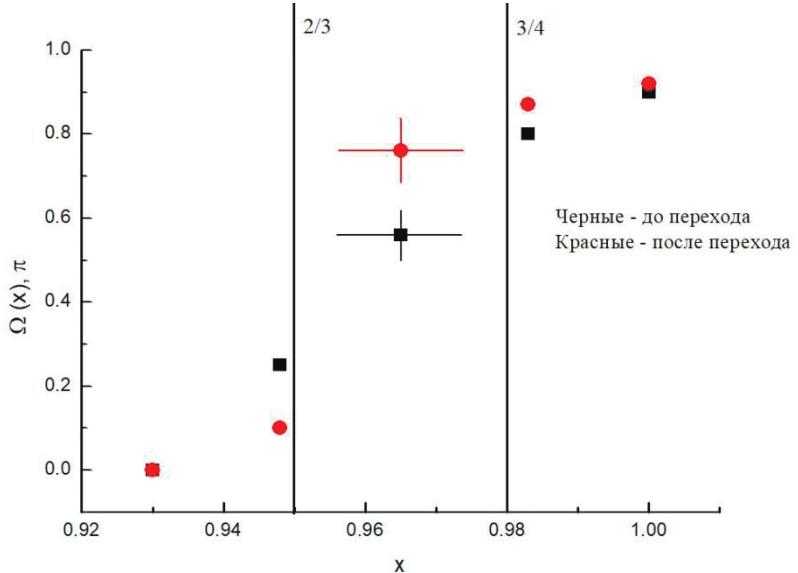


Рисунок 23. Средняя фаза между флюктуациями плавающего потенциала и ионного тока насыщения Ω в зависимости от положения зонда $x = r/a$. Вертикальные линии указывают расчетные положения рациональных магнитных поверхностей с $\mu = 2/3$ и $\mu = 3/4$.

Показано, что зависимость $\Omega(f)$ имеет слоистую структуру. Для низких частот $\Omega(f \leq 10 \text{ кГц}) \leq 0.1\pi$; в данном диапазоне все определенные выше характерные плазменные частоты оказываются одного порядка, высокие частоты не вносят вклад в значение $\Omega(f)$. Отличие от нуля сдвига фаз создается средним диапазоном частот $f = 10\text{--}50 \text{ кГц}$. Частоты больше 60 кГц не оказывают влияния на величину Ω . Обнаружено, что для более глубоких областей плазмы могут быть существенны механизмы, основанные на стабилизации за счет конечного ларморовского радиуса ионов и неоднородности стационарного электрического поля [A9].

В разделе 7.4 рассматриваются радиальная структура присепаратрисной области (относительный радиус 0.8-1) и флюктуации параметров плазмы в режиме без изменения макропараметров.

Обнаружено, что квазистационарными свойствами обладает режим нагрева с мощностью СВЧ до 150 кВт, или при удельной мощности до 600 кВт/м³. При повышении мощности нагрева возможны спонтанные переходные

процессы, вызванные развитием пилинг и резистивных перестановочных мод. Дрейфовые моды наблюдаются при квазистационарных режимах, однако они не вызывают переходных процессов и заметных изменений макропараметров плазмы. Тепловые потоки, переносимые плазмой, рассчитывались как сумма неоклассических и аномальных потоков, причем вклад неоклассических потоков в несколько раз выше аномальных везде, кроме области вблизи сепараторы шириной порядка ионного ларморовского радиуса [A30].

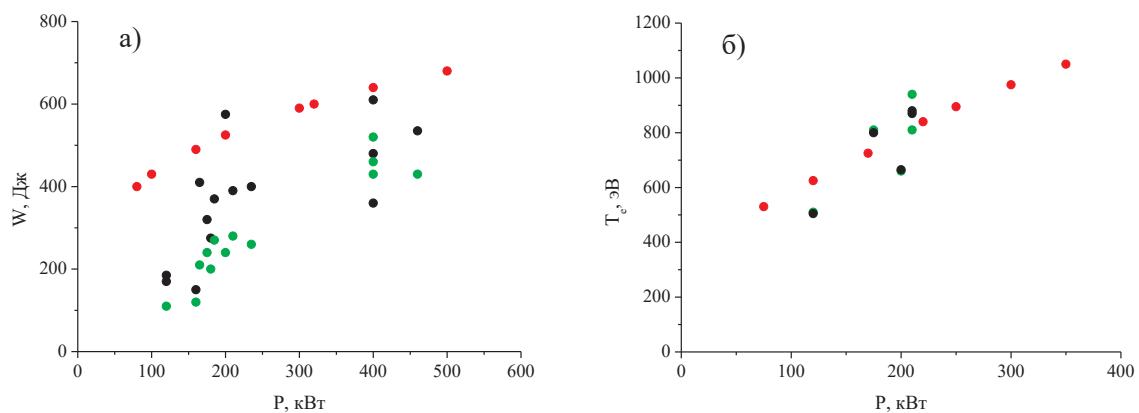


Рисунок 24. а) Зависимость энергосодержания плазмы и центральной электронной температуры плазмы в Л-2М от мощности ЭЦР-нагрева и моделирование транспортными кодами. Черные точки – эксперимент, зеленые – модель канонических профилей, красные – модель неоклассического переноса с аномальной составляющей. а) энергосодержание плазмы, б) электронная температура в центре.

Энергия и электронная температура плазмы, рассчитанные по моделям неоклассического переноса с учетом аномальных потерь и канонических профилей, достаточно хорошо согласуются с экспериментом, причем выбор параметрических коэффициентов при расчете аномальности практически не влияет на результат расчета (рис. 24).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе представлены результаты исследования высокотемпературной плазмы в стеллараторе Л-2М (квазистационарной магнитной ловушке с трехмерной геометрией), создаваемой и нагреваемой с помощью СВЧ-излучения. Последовательно рассмотрены состояния

плазменного шнура установки при увеличении мощности электронно-циклотронного нагрева плазмы от 0.05 до 1 МВт. Основным методом исследований является физический эксперимент, а для интерпретации полученных данных использовались аналитические методы. При анализе параметров турбулентных процессов применялись численные методы анализа временных рядов, включающие корреляционный, Фурье и вейвлет. Исследование удержания плазмы без индукционного тока способствуют поиску связей между макропараметрами плазмы, характеристиками переноса и плазменной турбулентностью.

Особенно важными являются следующие результаты:

1. Отсутствие проблем, связанных с наличием индукционного тока в случае токамака, упрощает на стеллараторах сравнительный анализ между макропараметрами плазмы и параметрами турбулентности. В то же время, благодаря связям между свойствами плазмы в токамаках и стеллараторах, можно использовать результаты экспериментов, полученные на стеллараторе Л-2М, для интерпретации экспериментов, проводимых на токамаках.
2. В диапазоне мощностей электронного циклотронного резонансного нагрева 0.05–0.6 МВт скейлинг энергобаланса бестоковой плазмы стелларатора Л-2М подчиняется закону $\tau_E \sim (P/n_e)^{-0.7}$. Одномашинный скейлинг в условиях сверхвысокой удельной мощности ЭЦР-нагрева указывает на более сильную зависимость от плотности и меньшую от мощности по сравнению с многомашинными стеллараторными скейлингами ISS95, ISS2004, однако эти различия незначительны.
3. Индукционные токи амплитудой $5 \leq |I| \leq 20$ кА не нарушают равновесия и устойчивости плазменного шнура, но снижают температуру на 30%. При отсутствии индукционных токов мощный центральный ЭЦР-нагрев приводит к нескомпенсированному током усиленному выносу плазмы из центра на периферию (эффект pump-out). Наличие неиндукционных токов $|I| \leq 2.5$ кА также не приводит к заметным нарушениям устойчивости и равновесия.

4. Устойчивая магнитная конфигурация позволяет получать разряды со стационарной фазой, периодически нарушаемые спонтанными переходными процессами из-за развития краевых неустойчивостей и повышенного взаимодействия плазмы со стенками. При удельной мощности нагрева $0.6 \text{ МВт}/\text{м}^3$ спонтанные переходные процессы приводят к перестройке приграничной плазмы и изменению структуры турбулентности. При удельной мощности нагрева $2 \text{ МВт}/\text{м}^3$ спонтанные переходные процессы (L-H переходы) в режим улучшенного удержания приводят к увеличению концентрации электронов n_e на 50% и энергии W на 25%.

5. В стеллараторе Л-2М создание плазменного шнура и его стабилизация реализуются только за счет ЭЦР-нагрева в широком диапазоне параметров. Использование модуляционных режимов ЭЦР-нагрева в стеллараторе Л-2М дает возможность 4-кратного увеличения энергетического времени жизни плазмы τ_E по сравнению с одноимпульсным режимом.

6. В стеллараторе Л-2М получены устойчивые плазменные разряды с удельной мощностью ЭЦР-нагрева на уровне мирового рекорда $4 \text{ МВт}/\text{м}^3$ ($2 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}$ на частицу). При удельных мощностях выше $3 \text{ МВт}/\text{м}^3$ предположительно из-за поступления и накопления примесей значения τ_E уменьшаются относительно предсказаний скейлинга.

7. При удельной мощности нагрева $P' \leq 600 \text{ кВт}/\text{м}^3$ в установке наблюдается квазистационарный режим. При повышении мощности нагрева возможны переходные процессы, связанные с развитием локальных МГД неустойчивостей типа пилинг-моды, в то время как температурные градиентные неустойчивости, существующие на квазистационарной стадии, только влияют на рост перенос частиц и энергии. Измеренные потоки частиц и энергии согласуются с моделями неоклассического переноса с аномальной поправкой, так и моделью на основе канонических профилей давления

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для планирования и проведения экспериментов по удержанию высокотемпературной плазмы в магнитных ловушках при ЭЦР-нагреве.

Основные публикации автора по теме диссертации

- A1. Федягин О.И., Акулина Д.К., Батанов Г.М., Бережецкий М.С., **Васильков Д.Г.**, Вафин И.Ю., Воронов Г.С., Воронова Е.В., Гладков Г.А., Гребенщиков С.Е., Коврижных Л.М., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малых Н.И., Мещеряков А.И., Нечаев Ю.И., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Щепетов С.В., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В. Энергобаланс плазмы в stellarаторе Л-2М // Физика плазмы. – 2007. – Т. 33. - № 10. - С. 880-890.
- A2. Акулина Д.К., Батанов Г.М., Бережецкий М.С., **Васильков Д.Г.**, Вафин И.Ю., Воронов Г.С., Воронова Е.В., Гладков Г.А., Гребенщиков С.Е., Гришина И.А., Князев А.В., Коврижных Л.М., Колик Л.В., Кузнецов А.Б., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малых Н.И., Мещеряков А.И., Нечаев Ю.И., Петров А.Е., Пшеничников А.А., Саенко В.В., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Федягин О.И., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В., Щепетов С.В. Устойчивость и изменение параметров плазмы в stellarаторе Л-2М при возбуждении индукционного тока в режиме ЭЦР-нагрева // Физика плазмы. – 2008. – Т. 34. – № 12. – С. 1059-1070.
- A3. Воронов Г.С., Акулина Д.К., Батанов Г.М., Бережецкий М.С., **Васильков Д.Г.**, Вафин И.Ю., Воронова Е.В., Гладков Г.А., Гребенщиков С.Е., Гришина И.А., Колик Л.В., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Мещеряков А.И., Нечаев Ю.И., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Федягин О.И., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В., Щепетов С.В. Исследование перехода в режим удержания с краевым транспортным барьером при ЭЦР нагреве плазмы в stellarаторе Л-2М // Прикладная физика. – 2008. – № 6. – С. 48-53.
- A4. Shchepetov S.V., Kholnov Yu.V., Fedyanin O.I., Kuznetsov A.B., **Vasilkov D.G.**, Akulina D.K., Batanov G.M., Gladkov G.A., Grebenschchikov S.E. and Meshcheryakov A.I. Sandwich structure of plasma edge during transition to improved confinement regime in L-2M stellarator // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2008. – V. 50. – 045001 (16 pp).

- A5. Воронов Г.С., Акулина Д.К., Батанов Г.М., Бережецкий М.С., **Васильков Д.Г.**, Вафин И.Ю., Воронова Е.В., Гребенщиков С.Е., Гришина И.А., Колик Л.В., Ларионова Н.Ф., Логвиненко В.П., Малахов Д.В., Мещеряков А.И., Нечаев Ю.И., Петров А.Е., Сарксян К.А., Саенко В.В., Скворцова Н.Н., Федягин О.И., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В., Щепетов С.В. Исследование удержания плазмы в стеллараторе Л-2М при образовании краевого транспортного барьера // Физика плазмы. – 2010. – Т. 36. – № 7. – С. 595-601.
- A6. Shchepetov S.V., Kholnov Yu.V. and **Vasilkov D.G.** On interrelation between inward turbulent flux and rational magnetic surfaces at plasma edge // JETP Letters. – 2010. – V. 91. – No. 4. – P. 170–173.
- A7. Kharchev N.K., Batanov G.M., Berezhetskii M.S., Borzosekov V.D., Fedyanin O.I., Grebenschikov S.E., Grishina I.A., Khol'nov Yu.V., Kolik L.V., Konchekov E.M., Kovrizhnykh L.M., Larionova N.F., Malakhov D.V., Meshcheryakov A.I., Petrov A.E., Pleshkov E.I., Sarksyan K.A., Shchepetov S.V., Skvortsova N.N., Stepakhin V.D., Vafin I.Yu., **Vasilkov D.G.** and Voronov G.S. Recent ECRH Experiments in the L-2M Stellarator with the Use of a New High-Power Gyrotron // Plasma and Fusion Research. – 2011. – V. 6. – 2402142.
- A8. Воронов Г.С., Батанов Г.М., Бережецкий М.С., Бондарь Ю.Ф., Борзосеков В.Д., Вафин И.Ю., **Васильков Д.Г.**, Гребенщиков С.Е., Гришина И.А., Колик Л.В., Кончеков Е.М., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малахов Д.В., Мещеряков А.И., Плешков Е.И., Петров А.Е., Сарксян К.А., Сатунин С.Н., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В., Федягин О.И., Цыганков В.А., Курнаев В.А., Визгалов И.В., Урусов В.А., Антипенков А., Пирс Р., Ворх Л. Испытания на стеллараторе Л-2М спектроскопического метода обнаружения микротечи воды в реакторе ИТЭР // Физика плазмы. – 2012. – Т. 38. – № 9. – С. 769-778.
- A9. Щепетов С.В., Хольнов Ю.В. и **Васильков Д.Г.** О сдвиге фаз между флюктуациями потенциала и плотности плазмы в краевой турбулентности // Физика плазмы. – 2013. – Т. 39. – № 2. – С. 151-161.

- A10. **Васильков Д.Г.**, Хольнов Ю.В., Щепетов С.В.. Дальние пространственные корреляции в турбулентной приграничной плазме стелларатора Л-2М // Физика плазмы. – 2013. – Т. 39. – № 8. – С. 694-703.
- A11. Щепетов С.В., Хольнов Ю.В., **Васильков Д.Г.** О поведении плазмы с отрицательным током в стеллараторе Л-2М // Физика плазмы. – 2015. – Т. 41. – № 9. – С. 758-766.
- A12. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., **Васильков Д.Г.**, Кончеков Е.М., Малахов Д.В., Сарксян К.А., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В. Влияние турбулентности в переходном процессе электронно-циклotronного нагрева на стеллараторе Л-2М // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 102. – Вып. 4. – С. 245-249.
- A13. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., **Васильков Д.Г.**, Вафин И.Ю., Гребенщиков С.Е., Кончеков Е.М., Летунов А.А., Мещеряков А.И., Сарксян К.А., Терещенко М.А., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В. Транспортный переход в плазме стелларатора Л-2М: роль коротковолновой турбулентности // Прикладная физика. – 2015. – № 6. – С. 61-64.
- A14. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., **Васильков Д.Г.**, Колик Л.В., Кончеков Е.М., Малахов Д.В., Вафин И.Ю., Петров А.Е., Сарксян К.А., Сахаров А.С., Степахин В.Д., Харчев Н.К. Отражение и обратное рассеяние волн при удвоении плотности плазмы и смещении области гирорезонанса в условиях электронно-циклotronного нагрева плазмы на стеллараторе Л-2М // Физика плазмы. – 2016. – Т. 42. – № 8. – С. 707-715.
- A15. Щепетов С.В., **Васильков Д.Г.** Может ли МГД-неустойчивость спровоцировать переход в режим с улучшенным удержанием в тороидальной плазме? // Физика плазмы. – 2017. – Т. 43. – № 7. – С. 1-6.
- A16. Батанов Г.М., Бережецкий М.С., Борзосеков В.Д., **Васильков Д.Г.**, Вафин И.Ю., Гребенщиков С.Е., Гришина И.А., Колик Л.В., Кончеков Е.М., Ларионова Н.Ф., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Малахов Д.В., Мещеряков А.И., Петров А.Е., Сарксян К.А., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Харчевский А.А., Хольнов Ю.В., Щепетов С.В. Реакция микротурбулентности на краю и в центре плазменного шнуря на импульсную

- инжекцию примесей при распылении покрытия стенки камеры стелларатора Л-2М // Физика плазмы. – 2017. – Т. 43. – № 8. – С. 666-672.
- A17. Щепетов С.В., **Васильков Д.Г.**, Хольнов Ю.В. Об экспериментальном обнаружении неустойчивой моды в теоретически идеальной МГД-устойчивой плазме стелларатора Л-2М // Физика плазмы. – 2018. – Т. 44. – № 6. – С. 1-6.
- A18. Shchepetov S.V., Tereshchenko M.A., **Vasilkov D.G.** and Kholnov Yu.V. Second harmonic ECRH breakdown: a theoretical insight and comparison to experimental results from L-2M // Plasma Phys. Control. Fusion. – 2018. – V. 60. – 125003.
- A19. Гребенщиков С.Е., Харчев Н.К., **Васильков Д.Г.** Измерение поглощаемой СВЧ-мощности при ЭЦР-нагреве плазмы в стеллараторе Л-2М // Прикладная физика. – 2019. – № 2. – С. 5-14.
- A20. Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., **Васильков Д.Г.**, Гребенщиков С.Е., Колик Л.В., Кончеков Е.М., Летунов А.А., Петров А.Е., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Харчевский А.А. Потери энергии и микротурбулентность при нестационарном ЭЦ нагреве плазмы на стеллараторе Л-2М // Физика плазмы. – 2019. – Т. 45. – С. 685-694.
- A21. **Васильков Д.Г.**, Батанов Г.М., Борзосеков В.Д., Вафин И.Ю., Гребенщиков С.Е., Гришина И.А., Иванов В.А., Летунов А.А., Логвиненко В.П., Мещеряков А.И., Петрова М.Н., Степахин В.Д., Харчев Н.К., Хольнов Ю.В. Импульсно-периодический режим ЭЦР-нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2020. – Т. 43. – Вып. 3. – С. 79-89.
- A22. Grebenschchikov S.E., **Vasilkov D.G.**, Ivanov V.A., Sarksyan K.A., Tereshchenko M.A., and Kharchev N.K. Creation and Heating of Plasma by Means of Electron Cyclotron Resonance in L-2M Stellarator // Plasma Phys. Rep. – 2022. – V. 48. – P. 183-192.
- A23. **Vasilkov D.G.**, Tereshchenko M.A. On the Issue of Transient Processes Resulting in Stabilization of Plasma Column in the L-2M Stellarator // Plasma Physics Reports. – 2022. – V. 48. – P. 711-719.

- A24. **Васильков Д.Г., Хольнов Ю.В.** Структура и эволюция электромагнитных возмущений в плазме стелларатора Л-2М // Физика плазмы. – 2022. – Т. 48. – С. 890-897.
- A25. **Vasilkov D., Grebenschikov S., Grishina I., Ivanov V., Kharchev K., Meshcheryakov A. and Stepakhin V.** Plasma confinement in the L-2M stellarator at high microwave heating powers // Fusion Science and Technology. – 2024. – V. 80. – P. 826-832.
- A26. **Васильков Д.Г., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К.** Структура флуктуаций в краевой плазме стелларатора в режимах с транспортными переходами. // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – С. 731-739.
- A27. **Vasil'kov D.G. and Kharchev N.K.** An Increase in Plasma Energy Lifetime in the Profiled-Pulse Regime in the L-2M Stellarator // Plasma Physics Reports. – 2023. – V. 49. – 1443-1447.
- A28. **Днестровский Ю.Н., Мельников А.В., Лысенко С.Е., Мещеряков А.И., Харчев Н.К., Васильков Д.Г., Гребенщиков С.Е., Касьянова Н.В., Черкасов С.В., Вафин И.Ю., Елисеев Л.Г., Сычугов Д.Ю.** Сравнение переноса энергии в плазме с ЭЦР-нагревом на стеллараторе Л-2М и токамаке Т-10 // Физика плазмы. – 2024. – Т. 50. – С. 526-542.
- A29. **Васильков Д.Г., Борзосеков В.Д., Скворцова Н.Н., Харчев Н.К.** Спонтанные и вынужденные переходные процессы в плазме стелларатора Л-2М в режиме высокой мощности ЭЦР-нагрева // Физика плазмы. – 2024. – Т. 50. – С. 983-995.
- A30. **Васильков Д.Г., Харчев Н.К.** Свойства краевой плазмы и периферийный перенос в квазистационарных стеллараторах Л-2 и Л-2М // Физика плазмы. – 2025. – Т. 51. – С. 447-460.