

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

На правах рукописи

Солоха Владимир Владимирович

**Магнитогидродинамическая устойчивость краевой плазмы в
сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2**

Специальность 1.3.9 — «Физика плазмы»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2025

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

Научный руководитель: **Курские Глеб Сергеевич**
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Научный консультант: **Яшин Александр Юрьевич**
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого

Официальные оппоненты: **Кавеева Елизавета Геннадьевна,**
Доктор физико-математических наук,
ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого, ведущий научный
сотрудник

Степаненко Александр Александрович,
кандидат физико-математических наук,
Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Институт ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН**

Защита состоится на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке на сайте Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, www.ioffe.ru.

Автореферат разослан .

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

Ученый секретарь
диссертационного совета
ФТИ 34.01.03, к. ф.-м. н.

Г. С. Курские

Актуальность

Режим работы термоядерного реактора с подавленным переносом тепла и частиц — Н-мода, известный с 1982 года характеризуется неоднородным полоидальным вращением плазмы, приводящим к снижению пространственного шага турбулентной диффузии и высоким градиентам давления на границе плазменного шнура. Наличие градиентов давления и повышенной плотности тока вблизи сепаратрисы вызывает развитие краевых неустойчивостей. Моделью, описывающей магнитогиродинамические неустойчивости в краевой плазме, является пилинг-баллонная модель. Согласно пилинг-баллонной модели, краевые неустойчивости вызывают перезамыкания силовых линий магнитного поля, что приводит к попаданию частиц плазмы на стенки вакуумной камеры, распыляют вещество с поверхности, что вызывает увеличение интенсивности излучения водородных и примесных линий. Таким образом, краевые неустойчивости приводят к уменьшению эффективности работы термоядерного реактора. Представленная работа направлена на изучение краевых неустойчивостей в сферических токамаках в сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2 и на прогнозирование устойчивости краевой плазмы проекта токамака Глобус-3. Сферические токамаки позволяют получать высокотемпературную плазму с ионными температурами более 4 кэВ [1] и отношением газокINETического давления к магнитному давлению более 30% [2] при более низких затратах на постройку и обслуживание, чем классические токамаки.

Степень проработанности темы исследования

Магнитогиродинамические неустойчивости, развивающиеся в краевой плазме токамака, условия их возникновения и их влияние на режимы работы токамака хорошо изучены и представлены в ряде работ и монографий. Однако, особенности развития краевых неустойчивостей в разрядах с внутренними перезамыканиями являются менее изученными, особенно в сферических токамаках, где величина магнитного поля и магнитного шира в краевой плазме отличается от значений в классических токамаках. Слабо изученным является развитие краевых неустойчивостей в сферических токамаках с формой плазменного шнура, обладающей значениями треугольности менее 0.2. Также, слабо изучено развитие краевых неустойчивостей в разрядах сферического токамака с тороидальным магнитным полем более 0.6 Тл.

Цель и задачи работы

Исследовать причины возникновения краевых неустойчивостей в плазме токамаков Глобус-М и Глобус-М2. На основании полученных результатов предложить оптимальные инженерные параметры токамака Глобус-3.

Для достижения указанных целей были поставлены следующие задачи:

- Классифицировать краевые неустойчивости в экспериментах на токамаках Глобус-М и Глобус-М2. Определить условия для независимого развития краевых неустойчивостей

и условия для развития краевых неустойчивостей, вызванных пилообразными колебаниями.

- Адаптировать программный код для вычисления диаграмм устойчивости краевой плазмы токамаков Глобус-М/М2 и Глобус-3. Провести численные эксперименты по расчёту инкремента магнитогидродинамической неустойчивости в краевой плазме токамаков Глобус-М и Глобус-М2. Произвести оценку устойчивости краевой плазмы проекта токамака Глобус-3.
- Провести экспериментальные исследования влияния формы плазменного шнура на устойчивость краевой плазмы токамака Глобус-М2.

Научная новизна

- Впервые на сферическом токамаке исследованы причины развития краевых неустойчивостей в разрядах при тороидальном магнитном поле $B_T = 0.7-0.8$ Тл.
- Впервые предложена гипотеза о синхронизации перезамыканий магнитных силовых линий в центральной области плазмы, возникающих при пилообразных колебаниях, и развития пилинг-баллонной моды, приводящей к неустойчивости краевой плазмы, посредством генерации тока вблизи сепаратрисы. Проведена оценка необходимой величины плотности тока для дестабилизации пилинг-баллонной моды.
- Впервые экспериментально продемонстрировано развитие краевых неустойчивостей в сферическом токамаке с низкими значениями давления (1.2 кПа) и треугольности плазмы (0.2) при тороидальном магнитном поле на оси вакуумной камеры 0.7 Тл. Развитие неустойчивости объяснено дестабилизацией пилинг-баллонной моды в рамках одножидкостной модели магнитогидродинамической устойчивости плазмы в тороидальной магнитной ловушке.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты, получены непосредственно автором или при его активном участии. Автор принимал прямое участие в эксперименте, обслуживал экспериментальную установку, производил анализ экспериментальных данных, выполнял теоретические и численные исследования, интерпретацию результатов экспериментов и расчётов самостоятельно. Автором предложен эксперимент по нейтральной инжекции в условиях низкой треугольности плазменного шнура. Совместно с научным руководителем Г.С. Курским, сформулированы тема, цели и задачи научного исследования, выработаны положения, выносимые на защиту, а также были обработаны данные диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М/М2. Совместно с научным консультантом А. Ю. Яшиным были обработаны данные диагностики доплеровского обратного рассеяния на токамаке Глобус-М/М2 и проведена валидация результатов моделирования кодом BOUT++.

Практическая значимость работы

Результаты исследования особенностей развития краевых неустойчивостей на сферических токамаках носят количественный характер и могут быть использованы для объяснения и предсказания устойчивости краевой плазмы токамаков к пилинг-баллонным модам. Сделанные выводы являются важными с точки зрения управления устойчивостью краевой плазмы и удержания энергии в токамаке-реакторе и токамаке – источнике нейтронов. Полученные в работе результаты позволили сделать прогнозы МГД устойчивости краевой плазмы проектируемого сферического токамака нового поколения Глобус-3, которые могут быть использованы для оптимизации инженерных параметров установки.

Достоверность результатов

Полученные в ходе работы результаты экспериментально обоснованы. Их достоверность обеспечена многократным повторением измерений, сопоставлением с данными, полученными различными диагностическими средствами и сравнением с результатами численного моделирования. Достоверность выводов на основе данных, полученных в ходе экспериментов на токамаках Глобус-М и Глобус-М2, обусловлена отсутствием противоречий между результатами, полученными в диссертации и результатами теоретических и экспериментальных исследований на других токамаках. Достоверность результатов моделирования обуславливается использованием верифицированных магнитогидродинамических моделей, валидацией полученных результатов расчёта на экспериментальных данных токамаков Глобус-М и Глобус-М2.

Методология и методы исследования

Задачи диссертационного исследования решены применением расчетных и экспериментальных методов. Экспериментальные исследования краевых неустойчивостей производились на сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2, расположенных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Определение наличия краевых неустойчивостей производилось с помощью спектрометрической диагностики излучения H_{α}/D_{α} на основе оптических фильтров и полупроводниковых диодов, также были использованы данные высокоскоростной видеокамеры. Определение наличия внутренних перезамыканий производилось с помощью диагностики мягкого рентгеновского излучения на основе полупроводниковых диодов, ограниченных фольгами. Плотность и температура фоновой плазмы были измерены методом томсоновского рассеяния, диагностикой на основе фильтровых полихроматоров и лазера в инфракрасном диапазоне. Флуктуации концентрации и полоидальной скорости вращения плазмы были измерены с помощью диагностики обратного доплеровского рассеяния. Восстановление величины магнитного потока производилось с помощью кодов PET, PyGSS и FreeGS. Измерение амплитуды магнитных флуктуаций было выполнено с помощью массива магнитных зондов.

Расчётное исследование по оценке инкрементов пилинг-баллонной моды проведено с

помощью одножидкостной магнитогидродинамической модели, имплементированной с помощью фреймворка BOUT++. Валидация расчётного эксперимента произведена с помощью экспериментальных данных, полученных на токамаке Глобус-М/М2.

Положения, выносимые на защиту

- В сферическом токамаке Глобус-М2 дестабилизация пилинг-баллонной моды и развитие спонтанных краевых неустойчивостей (типа ELM), не вызванных пилообразными колебаниями происходит в разрядах со средней концентрацией электронов более $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, мощностью дополнительного нагрева плазмы инжектором нейтральных частиц более 0.6 МВт, магнитным полем на оси вакуумной камеры $B_T = 0.8 \text{ Тл}$, током плазмы $I_P = 0.4 \text{ МА}$, треугольностью $\delta \approx 0.35$ и вытянутостью $\kappa \approx 1.7$ при достижении порогового значения давления плазмы (4 кПа) в области потоковых координат $\psi_n = 0.8 - 0.9$.
- Пороговое значение давления плазмы необходимое для дестабилизации пилинг-баллонной моды зависит от формы плазменного шнура на сферическом токамаке Глобус-М2. При низких значениях треугольности ($\delta \approx 0.2$) и большой вытянутости ($\kappa \approx 1.9$) плазменного шнура пороговое значение давления в 3 раза меньше, чем в режиме с треугольностью $\delta \approx 0.35$ и вытянутостью $\kappa \approx 1.7$.
- Дестабилизация пилинг-баллонной моды в сферических токамаках Глобус-М/М2 возможна при значениях давления плазмы вблизи сепаратрисы в четыре раза ниже порогового при треугольности 0.35. Для развития неустойчивости при этом достаточно роста плотности тока в области потоковых координат $\psi_n = 0.70 - 0.95$ до величины 80 кА/м^2 .

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 2017-2024 гг., изложены в четырнадцати печатных работах, автором и соавтором которых является В.В. Солоха, в том числе в **шести** статьях в рецензируемых журналах. Результаты, изложенные в диссертации, были представлены автором или при его участии на **семи** конференциях:

- Международная молодежная конференция Физика, СПб., 24-27 октября, 2017 года
- 45-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 2 - 6 апреля 2018 года
- Nature Conference Advances and Applications in Plasma Physics, St. Petersburg, Russia, 18 - 20 сентября 2019 года
- 48-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 15 - 19 марта 2021 года

- 49-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 14 - 18 марта 2022 года
- 50-ая Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород Московской обл. 19 - 23 марта 2023 года
- 29th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2023), г. Лондон, Великобритания, 16 - 21 октября 2023 года

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 127 страниц печатного текста, включая 1 таблицу и 38 рисунков. Список литературных источников содержит 187 наименований.

Публикации

Содержание и основные результаты диссертации отражены в **шести** публикациях в журналах индексируемых в БД Web of Science и Scopus:

- V.V. Solokha, G.S. Kurskiev, V.V. Bulanin, A.V. Petrov, S.Yu. Tolstyakov, E.E. Mukhin, V.K. Gusev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, V.A. Tokarev, N.A. Khromov, M.I. Patrov, N.N. Bakharev, A.D. Sladkomedova, A.Yu. Telnova, P.B. Shchegolev, E.O. Kiselev and A.Yu. Yashin «Simulations of peeling-ballooning modes in the Globus-M tokamak» J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012002 (2018)
doi:10.1088/1742-6596/1094/1/012002
- Буланин В.В., Гусев В.К., Курские Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Петров Ю.В., Присяжнюк Д.В., Сахаров Н.В., Солоха В.В., Толстяков С.Ю., Хромов Н.А., Яшин А.Ю. «Влияние низкочастотных магнитогидродинамических мод на развитие филаментов в токамаке Глобус-М» Письма в журнал технической физики 19, стр. 21 (2019)
doi: 10.21883/PJTTF.2019.19.48312.17933
- V V Solokha, V V Bulanin, G S Kurskiev, A Yu Yashin and N S Zhiltsov «The model of synchronization between internal reconnections and edge-localized modes» Plasma Phys. Control. Fusion 63 122001 (2021)
doi:10.1088/1361-6587/ac36a4
- В.В. Солоха, Г.С. Курские, А.Ю. Яшин, И.М. Балаченков, В.И. Варфоломеев, А.В. Воронин, В.К. Гусев, В.Ю. Горяинов, В.В. Дьяченко, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселев, В.Б. Минаев, А.Н. Новохацкий, Ю.В. Петров, А.М. Пономаренко, Н.В. Сахаров, А.Ю. Тельнова, Е.Е. Ткаченко, В.А. Токарев, С.Ю. Толстяков, Е.А. Тюхменева, Н.А. Хромов, П.Б. Щеголев. «Классификация краевых неустойчивостей на токамаке Глобус-М2»

- A. Ponomarenko, V. Gusev, E. Kiselev, G. Kurskiev, V. Minaev, A. Petrov, Y. Petrov, N. Sakharov, V. Solokha, N. Teplova, P. Shchegolev, A. Yashin and N. Zhiltsov «The investigation of edge-localized modes on the Globus-M2 tokamak using Doppler backscattering» Nucl. Fusion 64 022001 (2024)
doi:10.1088/1741-4326/ad0ead
- G. S. Kurskiev, V. B. Minaev, N. V. Sakharov, V. K. Gusev, Yu. V. Petrov, I. V. Miroshnikov, N. N. Bakharev, I. M. Balachenkov, F. V. Chernyshev, V. V. Dyachenko, V. Yu. Goryainov, M. V. Piasova, E. M. Khilkevich, N. A. Khromov, E. O. Kiselev, A. N. Kononov, S. V. Krikunov, A. D. Melnik, A. N. Novokhatskii, M. I. Patrov, P. B. Shchegolev, A. E. Shevelev, K. D. Shulyatiev, O. M. Skrekel, V. V. Solokha, A. Yu. Telnova, N. V. Teplova, E. E. Tkachenko, V. A. Tokarev, S. Yu. Tolstyakov, G. A. Troshin, E. A. Tukhmeneva, V. I. Varfolomeev, A. V. Voronin, N. S. Zhiltsov, P. A. Bagryansky, S. V. Ivanenko, I. V. Shikhovtsev, A. L. Solomakhin, E. N. Bondarchuk, A. A. Kavin, A. B. Mineev, V. N. Tanchuk, A. A. Voronova, K. V. Dolgova, A. V. Petrov, A. M. Ponomarenko, V. A. Rozhansky, V. M. Timokhin, A. Yu. Yashin, A. E. Konkov, P. S. Korenev, Yu. V. Mitrishkin, E. G. Zhilin, V. A. Solovey «Confinement, heating, and current drive study in Globus-M2 toward a future step of spherical tokamak program in Ioffe Institute» Phys. Plasmas 31, 062511 (2024)
doi:10.1063/5.0211866

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** к диссертации обоснована актуальность темы работы и проведённых исследований, отмечена степень разработанности темы диссертации. Показаны научная новизна и практическая значимость проведённых исследований, представлены научные положения, выносимые на защиту, описаны апробация работы на конференциях различного уровня, личный вклад автора в разработку проблемы и структура диссертации.

В **первой главе** отражено состояние исследований краевых неустойчивостей на момент написания диссертации. В первом разделе рассмотрено описание магнитной конфигурации плазменного шнура. Во втором разделе рассмотрены магнитогидродинамические неустойчивости в плазме токамака. Рассмотрен энергетический принцип, позволяющий аналитически описать внешние кинк-неустойчивости и перестановочные неустойчивости в условиях токамака с круглым сечением плазменного шнура, в частности описаны условия для достижения второй области устойчивости баллонной моды и важность градиента давления для описания пилинг-баллонной моды. В третьем разделе были рассмотрены микронеустойчивости, которые обуславливают перенос тепла и частиц в пьедестале токамака и регулируют взаимную

зависимость между высотой и шириной пьедестала. Представлены скейлинги ширины пьедестала для классических и сферических токамаков, используемые в работе. Четвёртый раздел посвящён экспериментальным наблюдениям краевых неустойчивостей в классических и сферических токамаках. Пятый раздел описывает влияние формы плазменного шнура на краевые неустойчивости. Шестой раздел описывает численные коды, которые позволяют анализировать устойчивость краевой плазмы в диверторных конфигурациях с различной формой плазменного шнура. В частности, описан далее используемый в диссертации фреймворк `VOU++` [3] для решения уравнений магнитногидродинамики в одножидкостном приближении и в трёхмерной геометрии токамака. Седьмой раздел описывает токамаки Глобус-М и Глобус-М2, которые являются сферическими токамаками в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, на которых проводились эксперименты, описанные в диссертации. Также приведено описание диагностического комплекса токамаков Глобус-М/М2. Восьмой раздел описывает проект токамака Глобус-3. Девятый раздел посвящён постановке задач.

Во **второй главе** представлено экспериментальное исследование краевых неустойчивостей на токамаках Глобус-М и Глобус-М2. В токамаке Глобус-М режим улучшенного удержания с наблюдаемыми краевыми неустойчивостями изучался с 2006 года [4]. На момент написания диссертации на токамаке Глобус-М были тщательно исследованы филаментарные структуры, которые возникают в ходе линейной фазы развития краевых неустойчивостей, однако систематических исследований краевой неустойчивости не производилось. Следовательно, задачей экспериментальных исследований, представленных ниже, была систематизация условий развития краевых неустойчивостей.

Соискателем была исследована база данных разрядов токамаков Глобус-М с развитием краевой неустойчивости. Было обнаружено, что краевые неустойчивости в большинстве случаев (более 90%) синхронизированы с внутренними перезамыканиями.

Характерные давления в краевой плазме для разрядов с синхронизированными перезамыканиями составляют 0.6-0.8 кПа в 2 см от сепаратрисы. При переходе в режим улучшенного удержания, давление краевой плазмы вырастает на 30% и приводит к развитию краевых неустойчивостей.

На токамаке Глобус-М2 разряды демонстрировали наличие синхронизированных и десинхронизированных (независимых) от внутренних перезамыканий краевых неустойчивостей (Рисунок 1). Примеры развития различных типов краевых неустойчивостей приведены для трёх разрядов с магнитным полем $B_T = 0.8$ Тл: с синхронизированными краевыми неустойчивостями №40707, с частично синхронизированными краевыми неустойчивостями №40715 и с десинхронизированными краевыми неустойчивостями №41105.

Синхронизированные неустойчивости на токамаке Глобус-М2 были исследованы для разработки модели, описывающей связь возбуждения пилинг-баллонной моды и внутреннего перезамыкания. Был проведён статистический анализ параметров разрядов Глобус-М2 с синхронизированными неустойчивостями для вычисления характерных временных задержек между внутренним перезамыканием и развитием краевой неустойчивости для проверки модельных предположений. В результате обработки данных было обнаружено, что временная

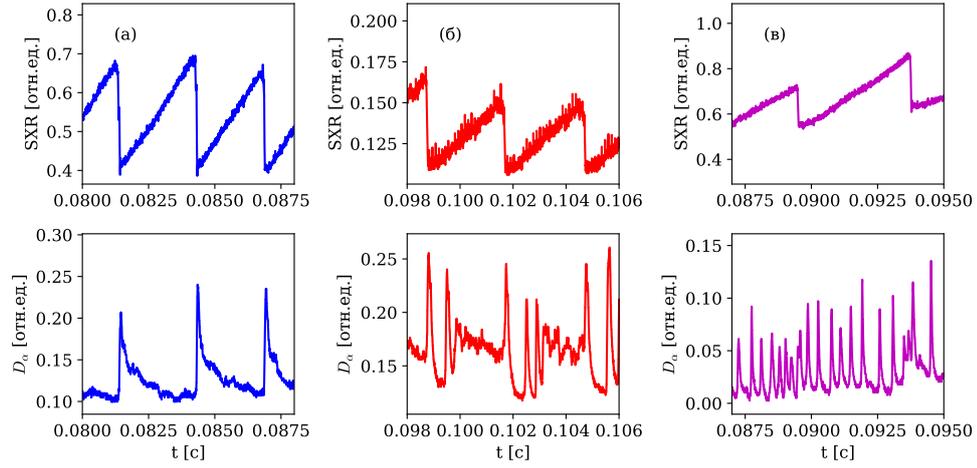


Рис. 1: (Верхний ряд) Интенсивность мягкого рентгеновского излучения в разрядах с $B_T = 0.8$ Тл и синхронизированными краевыми неустойчивостями №40707 с $I_P = 0.2$ МА и $P_{NBI} = 0.5$ МВт (а), частично синхронизированными краевыми неустойчивостями №40715 с $I_P = 0.4$ МА и $P_{NBI} = 0.5$ МВт (б) и полностью десинхронизированными краевыми неустойчивостями №41105 с $I_P = 0.4$ МА и $P_{NBI} = 0.7$ МВт (в). (Нижний ряд) Интенсивность излучения дейтериевой линии D_α из дивертора вышеуказанных разрядов.

задержка между внутренним перезаключением и развитием краевой неустойчивости составляет 156 ± 72 мкс.

При изучении развития синхронизированных краевых неустойчивостей на токамаке Глобус-М2 были обнаружены падение величины тока плазмы и рост напряжения на обходе в течение десятка микросекунд после пилообразного срыва. Характерные величины падения тока плазмы и роста напряжения на обходе составляли 0.7 кА и 0.3 В, соответственно, в разрядах с дополнительным нагревом пучком нейтральных частиц.

В диссертации рассмотрены механизмы синхронизации внутренних перезаключений и краевых неустойчивостей. Наиболее вероятным представляется механизм, который связывает возникновение дополнительной плотности тока в краевой плазме при внутреннем перезаключении с дестабилизацией пилинг-баллонной моды.

Частично синхронизированными краевыми неустойчивостями соискатель обозначает составные события, которые состоят из одного наблюдения синхронизированной краевой неустойчивости и следующих за ним нескольких десинхронизированных краевых неустойчивостей. Частично синхронизированные краевые неустойчивости наблюдаются в разрядах с высокими значениями тока по плазме ($I_P = 0.3$ МА) и мощностью дополнительного нагрева около $P_{NBI} = 0.5$ МВт. При увеличении мощности дополнительного нагрева частично синхронизированные краевые неустойчивости переходят в независимые краевые неустойчивости.

Независимые краевые неустойчивости наблюдаются в разрядах с высокими значениями тока по плазме ($I_P \geq 0.3$ МА) и высокими мощностями дополнительного нагрева ($P_{NBI} \geq 0.7$ МВт). Согласно традиционной классификации [5], наблюдаемые десинхронизированные краевые неустойчивости демонстрируют признаки развития краевой неустойчивости третьего типа, так как наблюдается снижение периода при повышении среднечордовой концентра-

ции. С другой стороны, десинхронизированные краевые неустойчивости не демонстрируют наличия когерентного магнитного прекурсора, характерного для третьего типа.

Для уточнения классификации десинхронизированных краевых неустойчивостей были проведены исследования с варьируемой мощностью дополнительного нагрева плазмы. Частота следования краевых неустойчивостей с одним источником дополнительного нагрева составляла $f_{ELM} = 1.2 \pm 0.3$ кГц, после подключения второго источника дополнительного нагрева частота следования десинхронизированных краевых неустойчивостей оставалась практически неизменной $f_{ELM} = 1.1 \pm 0.3$ кГц. Дополнительный статистический анализ серии похожих разрядов показал, что медианная частота следования краевых неустойчивостей в разрядах с одним и с двумя задействованными инжекторами нейтральных частиц не отличается.

На основе данных зависимостей можно заключить, что десинхронизированные краевые неустойчивости можно отнести к промежуточному пятому типу, который имеет схожие со вторым типом и третьим типом характеристики.

Давление в краевой плазме разряда с синхронизированными краевыми неустойчивостями ($P_{ped} = 1.1$ кПа) в два раза ниже, чем в разряде с частично синхронизированными краевыми неустойчивостями ($P_{ped} = 2.5$ кПа). Данные разряды демонстрируют схожие (разница менее 20%) профили концентрации электронов, в то время как температура электронов отличается в 1.5 раза. Наблюдаемое различие в температуре электронов вызвано в 2 раза большим током по плазме, который в свою очередь увеличивает время удержания энергии в 1.5 раза. Дальнейшее увеличение мощности инжекции нейтральных частиц не приводит к росту температуры электронов. В силу этого, дальнейшее увеличение давления в краевой плазме токамака происходит исключительно вследствие повышения концентрации электронов (Рисунок 2). Концентрация электронов была увеличена с помощью дополнительного газонапуска и с помощью увеличения тока нейтральной инжекции. В разряде №41105 увеличенная в 2 раза концентрация привела к соответствующему двукратному росту давления в центре (от 20 до 40 кПа) и в краевой плазме (от 2.5 до 4.2 кПа).

В **третьей главе** описано численное моделирование для анализа проведённых экспериментальных исследований на токамаках Глобус-М и Глобус-М2 с целью количественного предсказания условий развития краевых неустойчивостей. Моделирование развития пилинг-баллонной моды в данной главе было произведено с помощью решения уравнений одножидкостной МГД в линейном приближении с помощью кода VOUT++. Профиль давления в краевой плазме был параметризован гиперболическим тангенсом с двумя свободными параметрами: высотой и шириной пьедестала. Для заданного диапазона высот и ширин пьедестала вычислялся инкремент пилинг-баллонной неустойчивости образующий диаграмму устойчивости. Предсказания высоты и ширины, достижимые в краевой плазме, предсказывались согласно упрощенной модели EPED [6], в которой предполагалось, что развитие неустойчивости происходит при достижении критического инкремента пилинг-баллонной моды, а рост градиента давления в пьедестале ограничивается микронеустойчивостями.

Было численно изучено влияние полоидального вращения на устойчивость токамака

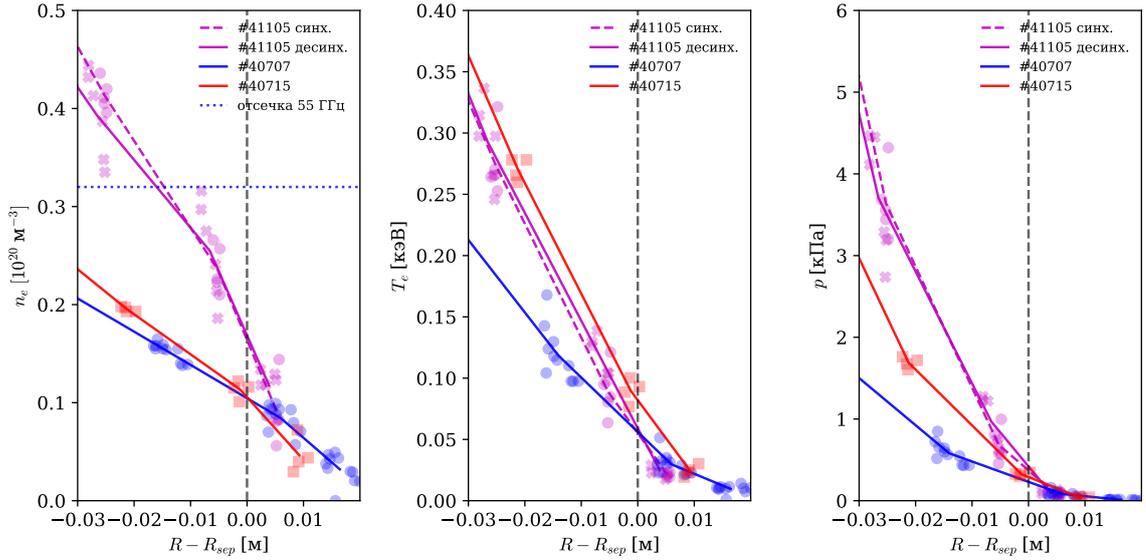


Рис. 2: Профили плотности электронов (слева), температуры электронов (по центру) и полное давление (справа), полученные с помощью диагностики томсоновского рассеяния в разрядах с синхронизированными краевыми неустойчивостями (№40707, голубые сплошные линии, круглые маркеры), частично синхронизированными краевыми неустойчивостями (№40715, красные сплошные линии, круглые маркеры) и полностью десинхронизированными краевыми неустойчивостями (№41105, фиолетовые сплошные линии, круглые маркеры). Профили из фазы разряда №41105 с синхронизированными краевыми неустойчивостями обозначены пунктирными линиями и крестовыми маркерами. Вертикальная пунктирная линия обозначает положение сепаратрисы. Горизонтальная точечная линия обозначает положение отсечки для 55 ГГц ДОР в разряде №41105. График в увеличенном масштабе.

Глобус-М для неустойчивой пилинг-баллонной моды. Вычисления показали, что полоидальное вращение не влияет на инкремент пилинг-баллонной неустойчивости. В качестве начальных условий использовался профиль полоидального вращения характерного для разряда Глобус-М в режиме улучшенного удержания [7].

Анализ устойчивости пилинг-баллонной моды для фиксированной магнитной конфигурации производился с помощью вычисления инкремента для различных значений высот (P_{ped}) и ширин (Δ) пьедестала вблизи экспериментальных значений. Полученные диаграммы устойчивости в пространстве высоты и ширины пьедестала позволяют оценить чувствительность устойчивости пилинг-баллонной моды как в исследуемом разряде, так и при изменении параметров краевой плазмы. Диаграмма устойчивости для магнитной конфигурации разряда Глобус-М №36612 изображена на Рисунке 3.

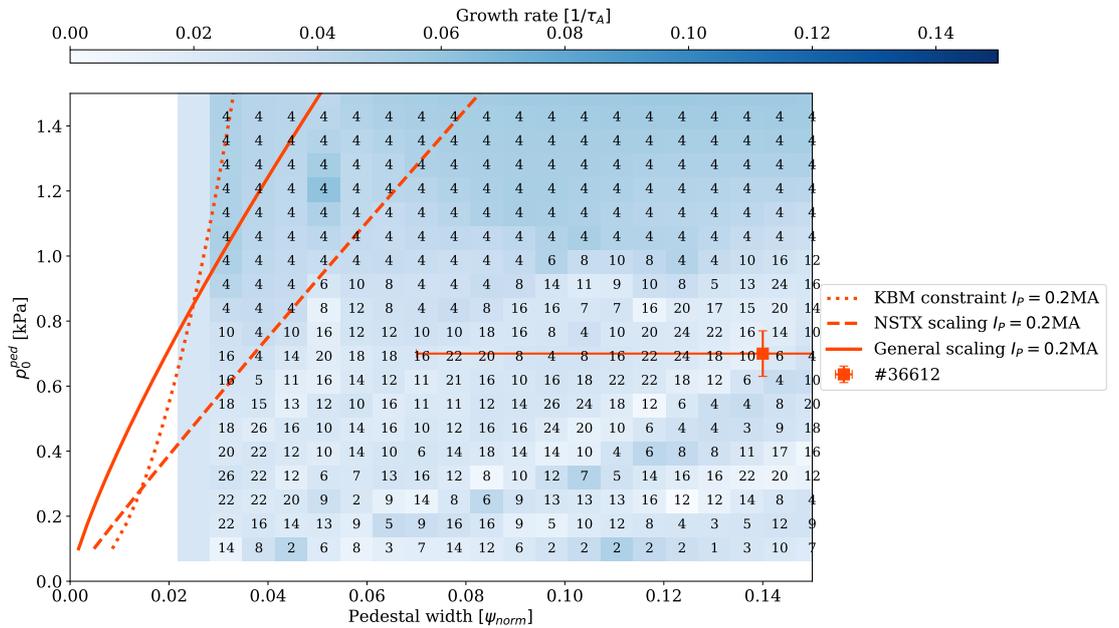


Рис. 3: Диаграмма устойчивости (зависимость инкремента пилинг-баллонной моды) от ширины пьедестала в потоковых координатах (ось абсцисс) и от высоты пьедестала (ось ординат) для разряда Глобус-М №36612. Ограничение кинетической баллонной моды показано мелкопунктирной линией, скейлинг ширины пьедестала для токамака NSTX показан пунктирной линией, обобщённый скейлинг показан сплошной линией. Цифрами обозначено тороидальное модовое число наиболее неустойчивой моды. Экспериментальные значения высоты и ширины пьедестала в разряде №36612 показаны красным маркером.

Полученная диаграмма устойчивости показывает, что для всего диапазона экспериментальных значений параметров пьедестала пилинг-баллонная мода устойчива и инкременты не превышают критического значения $\gamma_{PB} = 0.1 \tau_A^{-1}$. Оценка критического инкремента рассчитывается исходя из предположения, что пилинг-баллонная неустойчивость развивается

при начальных возмущениях с относительной амплитудой порядка 10^{-7} и успевает достичь величины 10^{-1} при которой возмущения становятся достаточными для стохастизации магнитных силовых линий. Предполагается, что данный процесс происходит за характерные времена между внутренним перезамыканием и вспышкой сигнала D_α . Характерные задержки составляют 100 мкс (150-200 альвеновских времён), что приводит к оценке критического инкремента около $\gamma_{PB} \approx 0.1 \tau_A^{-1}$. Также, оценка ширины характерного слоя на котором происходит перезамыкание при развитии пилинг-баллонной неустойчивости с экспериментальными значениями числа Кнудсена имеет размеры больше ларморовского радиуса ионов при инкрементах порядка $0.1 \tau_A^{-1}$ ($\Delta_R \approx R\sqrt{1/(\gamma\tau_A S)}$).

Для анализа устойчивости краевой плазмы Глобус-М2 соискателем была построена диаграмма устойчивости для магнитной конфигурации разряда №40715 с магнитным полем $B_T = 0.8$ Тл (Рисунок 4). На диаграмме для Глобус-М2 в отличие от диаграммы для Глобус-М, присутствует область с инкрементами, превышающими $\gamma_{PB} > 0.1 \tau_A^{-1}$, и, следовательно, неустойчивой пилинг-баллонной модой. Характерные для разрядов Глобус-М $\gamma_{PB} \approx 0.05\tau_A^{-1}$ на токамаке Глобус-М2 наблюдаются при давлении в пьедестале в три раза выше (Глобус-М $P_{ped} = 0.7$ кПа \rightarrow Глобус-М2 $P_{ped} = 2.1$ кПа). При увеличении давления на 20% в токамаке Глобус-М2 наблюдается (разряд №40715) переход к частично синхронизированным краевым неустойчивостям, что свидетельствует о приближении к границе устойчивости пилинг-баллонной моды. При достижении высоты пьедестала $P_{ped} = 4.0$ кПа наблюдается дестабилизация пилинг-баллонной моды и соответствующие ей десинхронизированные краевые неустойчивости.

Стоит отметить, что все режимы с десинхронизированными краевыми неустойчивостями имеют характерные модовые числа около $n \approx 4 - 5$, что указывает на дестабилизацию токовой ветви пилинг-баллонной моды и обуславливает отсутствие краевых неустойчивостей первого типа.

Для объяснения феномена синхронизации внутренних перезамыканий и краевых неустойчивостей необходимо введение в модель дополнительного воздействия, так как расчёты показали, что пилинг-баллонная мода стабильна в Глобус-М (Рисунок 3). Одним из данных воздействий может являться увеличение плотности тока в краевой плазме, которое понижает значение магнитного шира вблизи сепаратрисы и вызывает дестабилизацию пилинг-моды.

Влияние увеличения плотности тока на устойчивость пилинг-баллонной моды было исследовано с помощью решения системы уравнений одножидкостной МГД кодом VOUT++ идентично предыдущему разделу. Расчётная сетка и используемое магнитное равновесие соответствовали стационарной фазе разряда Глобус-М2 №39627, демонстрирующего синхронизированные краевые неустойчивости. Начальные условия на давление и ток, также соответствовали параметрам пьедестала разряда Глобус-М №39627. Основным отличием данного моделирования от предыдущего раздела является наличие дополнительного, индуцированного внешним процессом, электрического поля и соответствующей плотности тока. Дополнительная плотность тока была задана с помощью сигмоидной функции, которая прибавлялась к бутстреп и омической компонентам плотности тока. Использование сигмоидной функции

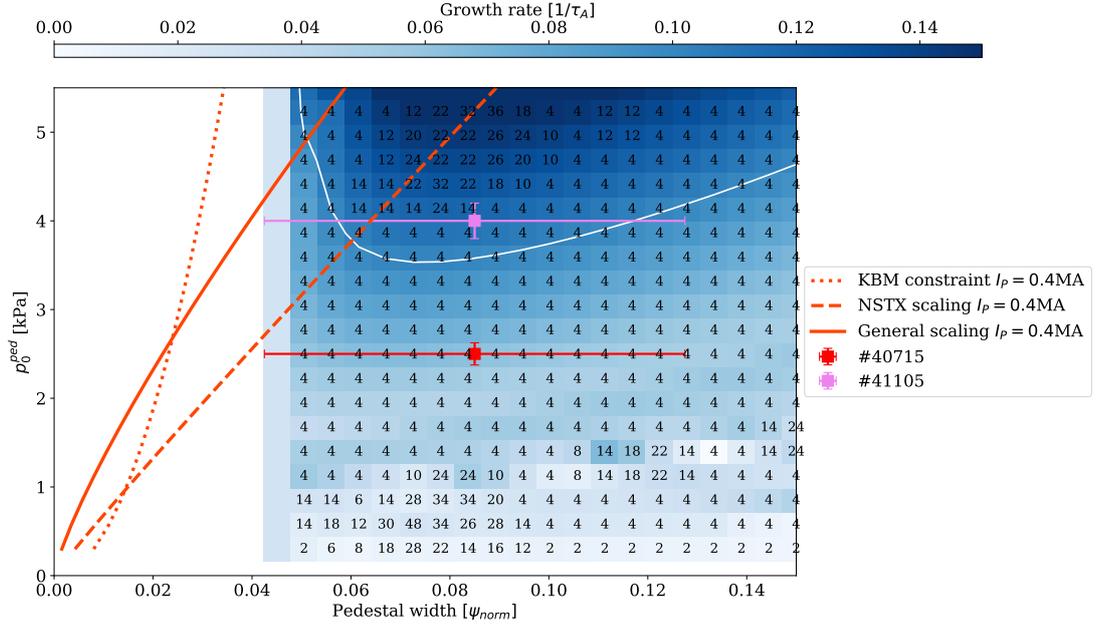


Рис. 4: Диаграмма устойчивости (зависимость инкремента пилинг-баллонной моды) от ширины пьедестала в потоковых координатах (ось абсцисс) и от высоты пьедестала (ось ординат) для разряда Глобус-М2 №40715. Положение границы устойчивости с инкрементом $0.1 \tau_A^{-1}$ обозначено белой линией. Ограничение кинетической баллонной моды показано мелко-пунктирной линией, скейлинг ширины пьедестала для токамака NSTX показан пунктирной линией, обобщённый скейлинг показан сплошной линией. Красный цвет линий соответствует току по плазме $I_P = 0.4$ МА. Экспериментальные значения высоты и ширины пьедестала показаны маркерами: красный цвет соответствует разряду №40715 ($I_P = 0.4$ МА) и фиолетовый цвет соответствует разряду №41105 ($I_P = 0.4$ МА). Цифрами обозначено тороидальное модовое число наиболее неустойчивой моды.

обусловлено предположением о пространственной неоднородности индуцируемого тока в силу градиента температуры электронов. Основными параметрами дополнительной плотности тока являлись радиальное положение и высота. Дополнительная плотность тока моделировалась в виде гиперболического тангенса с шириной $\Delta = 0.05$ и высотой $j_0^{ind} = 80$ кА/м² и тороидальной однородностью. Наличие дополнительного электрического поля вблизи сепаратисы не противоречит экспериментальным измерениям, так как в экспериментах на токамаке Глобус-М2 наблюдался рост напряжения на обходе при синхронизированном развитии краевой неустойчивости. Расчёт ширины скин-слоя показал, что для параметров плазмы токамака Глобус-М2 на расстоянии 1 см от сепаратисы толщина скин-слоя составляет около 5 мм.

Для количественной оценки влияния плотности тока на устойчивость пилинг-баллонной моды в пьедестале был проведён анализ зависимости значений инкремента пилинг-баллонной моды от положения дополнительной плотности тока относительно пьедестала. Результаты моделирования изображены на Рисунке 5.

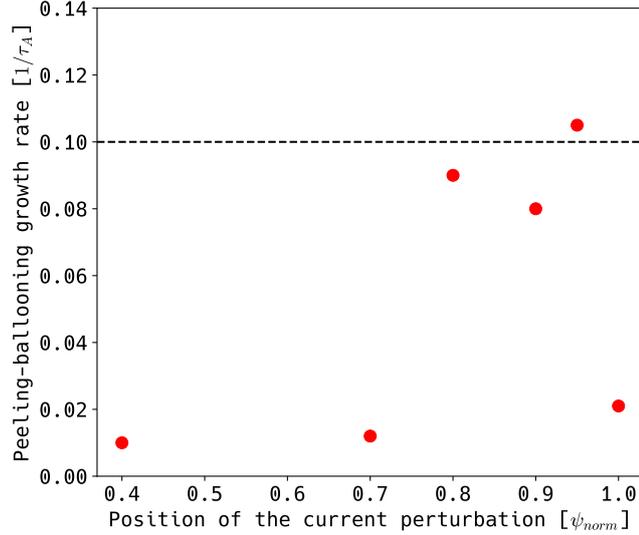


Рис. 5: Зависимость инкремента пилинг-баллонной неустойчивости от положения дополнительной плотности тока.

Стоит отметить, что при наличии дополнительной плотности тока на границе расчётной области инкремент пилинг-баллонной неустойчивости соответствует значению без учёта дополнительной плотности тока $\gamma_{PB} = 0.02 \tau_A^{-1}$ (Рисунок 3). При положении дополнительной плотности тока вблизи пьедестала инкремент пилинг-баллонной неустойчивости растёт, достигает величины $\gamma_{PB} = 0.10 \tau_A^{-1}$, достаточной для дестабилизации пилинг-моды и последующего наблюдения краевой неустойчивости. Наличие данной дополнительной плотности тока не противоречит экспериментальным наблюдениям роста напряжения на обходе.

МГД моделирование показывает, что при внутреннем перезамыкании на токамаках Глобус-М и Глобус-М2 возможно возникновение дополнительной плотности тока, которое на масштабах десятков алфвеновских времён дестабилизирует пилинг-баллонную моду и приводит к развитию краевой неустойчивости при положении дополнительной плотности тока $\psi_{norm} \in [0.70, 0.95]$, не оказывая значительного влияния на равновесие плазменного шнура.

Представленное одножидкостное моделирование было использовано для анализа устойчивости пьедестала проектируемого токамака Глобус-3. Предельные значения давления в пьедестале играют роль граничных условий для моделирования переноса энергии и частиц в центральной области плазменного шнура. Для анализа использовалось расчётное равновесие разряда токамака Глобус-3 при $B_T = 1.8$ Тл, $I_P = 0.8$ МА и $I_P = 2.0$ МА с двумя X-точками, полученное кодом PET [8].

Величина тока плазмы оказывает критическое влияние на пилинг-баллонную устойчивость токамака Глобус-3. В отличие от Глобус-М2, Глобус-3 обладает большим аспектным отношением (1.8 против 1.5), что приводит к понижению устойчивости плазмы токамака к идеальным баллонным модам [9]. При низких значениях тока по плазме и фиксированном значении бутстреп-тока, увеличение магнитного шира приводит к практической недоступности области второй стабильности идеальной баллонной моды и не позволяет достичь высоких значений давления в краевой плазме. В результате, дестабилизация пилинг-баллонной моды

(Рисунок 6) с высокими тороидальными модовыми числами, наблюдается при низких давлениях. Даже при учёте более широкого пьедестала достижимые давления в краевой плазме составляют 5-6 кПа, при которых ожидаются краевые неустойчивости первого типа.

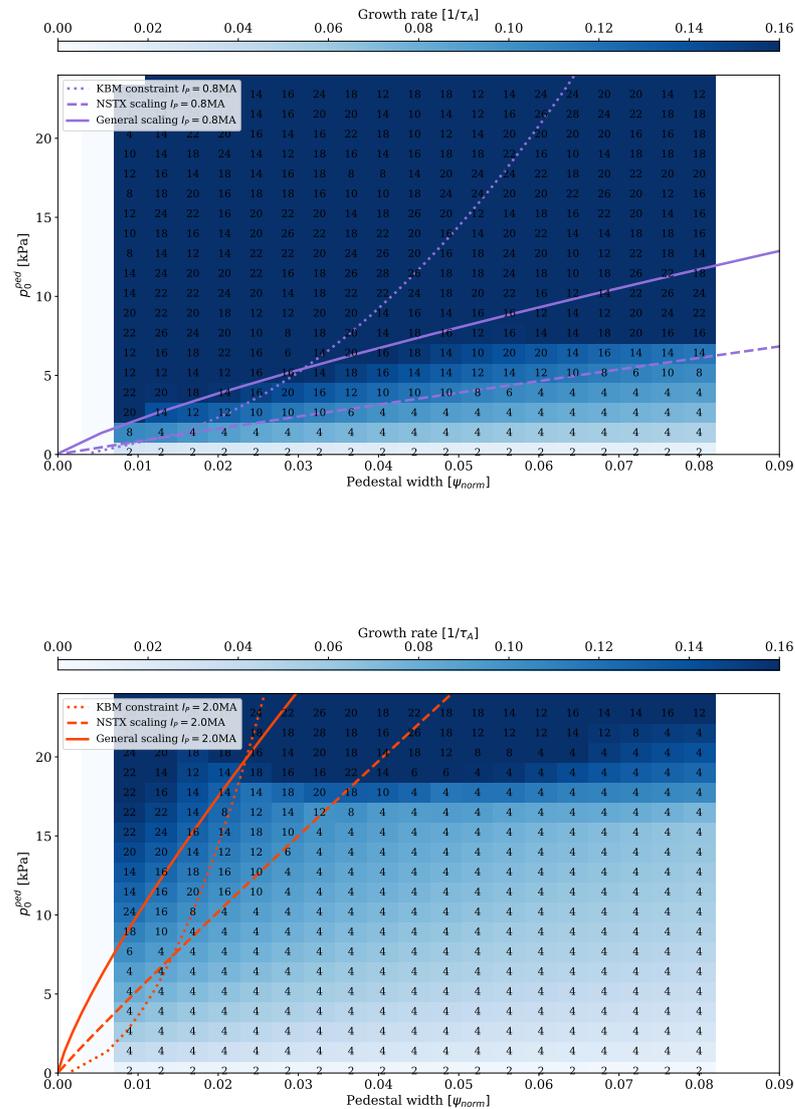


Рис. 6: Диаграмма устойчивости для магнитной конфигурации Глобус-3 при $V_T = 1.8$ Тл, $I_P = 0.8$ МА (верхний график) и $I_P = 2.0$ МА (нижний график). Ограничение кинетической баллонной моды показано мелко-пунктирной линией, скейлинг ширины пьедестала для токамака NSTX показан пунктирной линией, обобщённый скейлинг показан сплошной линией. Фиолетовый цвет линий соответствует току по плазме $I_P = 0.8$ МА, красный цвет линий соответствует току по плазме $I_P = 2.0$ МА. Цифрами обозначено тороидальное модовое число наиболее неустойчивой моды.

При увеличении тока плазмы от $I_P = 0.8$ МА до $I_P = 2.0$ МА происходит стабилизация пилинг-баллонной моды, приводящая к росту ожидаемых давлений в краевой плазме до 15-17 кПа (Рисунок 6). Рост давления обусловлен подавлением баллонной моды, и, как следствие, тороидальные модовые числа наиболее неустойчивой моды падают до значений характер-

ных для пилинг моды, близких к наблюдаемым на токамаке Глобус-М2 и соответствующих независимым краевым неустойчивостям третьего или пятого типа. Троекратная разница в полученных давлениях обусловлена различными значениями магнитного шира в краевой плазме.

Четвертая глава описывает исследование влияния формы плазменного шнура на устойчивость краевой плазмы токамака Глобус-М2. С учётом ранее полученной информации о высокой стабильности плазменного шнура токамака Глобус-М2 относительно развития баллонных неустойчивостей были проведены исследования по влиянию треугольности на устойчивость краевой плазмы. В типичных разрядах токамака Глобус-М2 треугольность составляла $\delta \in [0.3, 0.4]$. Для исследования влияния треугольности была проведена серия экспериментов с низкими значениями треугольности. В ходе проведённых экспериментов были получены значения средней треугольности $\delta \in [0.12, 0.25]$. Треугольность варьировалась с помощью катушек вертикального поля.

В описываемых разрядах ток плазмы составлял $I_p = 0.3$ МА, магнитное поле на оси $B_T = 0.7$ Тл, использовалась магнитная конфигурация с нижней X-точкой и градиентным дрейфом ионов в её направлении. Нагрев плазмы в описываемых разрядах производился с помощью инжекции нейтральных частиц с $E_{NBI} = 30$ кэВ и соответствующей мощности $P_{NBI} = 0.3$ МВт на протяжении всей стационарной фазы плазменного разряда.

Разряды с низкой треугольностью имели более высокие значения вытянутости плазмы ($\kappa = 1.95$) в сравнении с разрядами, обладающими треугольностью по умолчанию ($\kappa = 1.75$).

Влияние формы плазменного шнура на МГД устойчивость краевой плазмы рассмотрим на примере разряда №44330 (Рисунок 7). Данный разряд продемонстрировал наличие фазы улучшенного удержания с 50 мс по 70 мс. Вход в режим улучшенного удержания происходил при средней концентрации электронов $n_e = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и в момент кратковременного повышения треугольности от $\delta = 0.18$ до $\delta = 0.20$. В момент входа в режим улучшенного удержания наблюдается понижение амплитуды магнитных флуктуаций и соответствующее увеличение энергии, запасённой в плазме.

Режим улучшенного удержания в разряде №44330 сопровождается краевыми неустойчивостями с характерными всплесками на сигнале излучения дейтериевой линии D_α . Большинство краевых неустойчивостей в разряде №44330 десинхронизированны с внутренними перезамканиями. При выходе из режима улучшенного удержания наблюдается увеличение интенсивности излучения D_α и исчезновение краевых неустойчивостей.

Наблюдаемый переход в режим улучшенного удержания сопровождался соответствующим повышением давления в краевой плазме. Профили давления в краевой плазме для разряда №44330 указывают на 50-и% рост давления при переходе в режим улучшенного удержания, и 25-и% рост давления при повышении значения треугольности от $\delta = 0.18$ до $\delta = 0.21$. Рост давления при изменении треугольности происходит исключительно вследствие роста концентрации электронов. Температура электронов претерпевает незначительные изменения (Рисунок 8).

Одним из следствий работы в конфигурациях с низкой треугольностью является на-

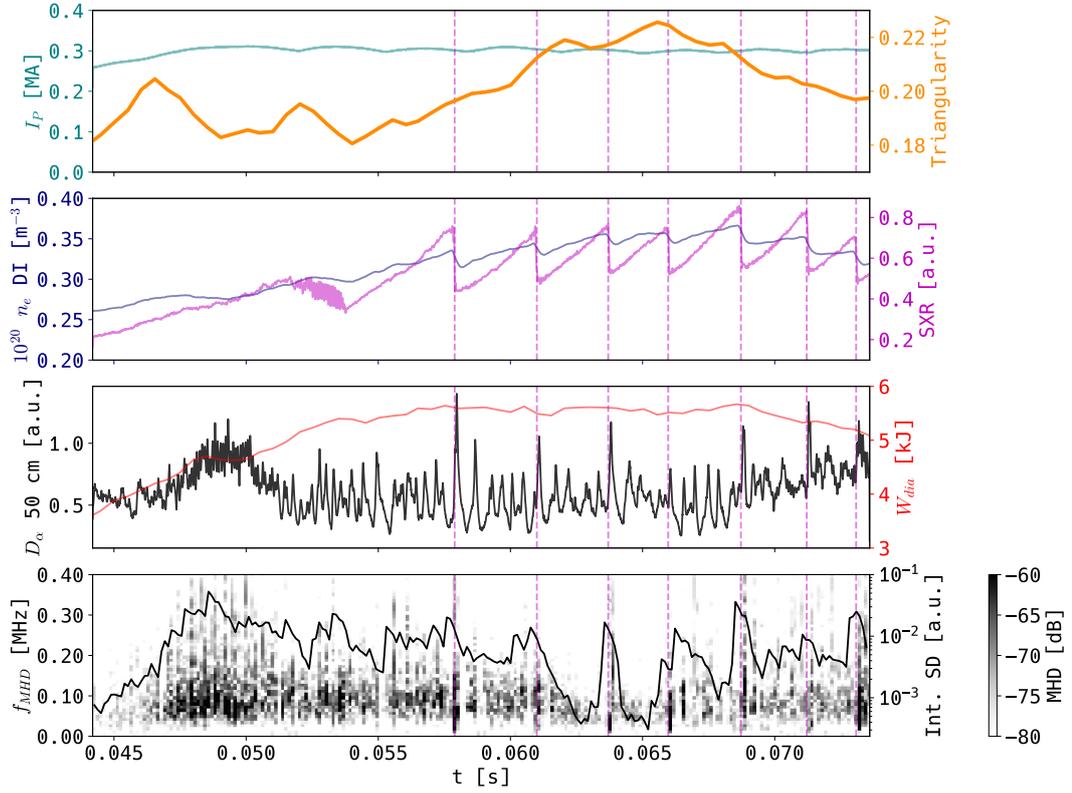


Рис. 7: (Верхний график) Ток плазмы (I_P , бирюзовая кривая) и средняя треугольность плазменного шнура (оранжевая кривая).

(Средний верхний график) Временной ход среднечордовой концентрации (n_e DI, синяя кривая) и интенсивность мягкого рентгеновского излучения (SXR, розовая кривая) для разряда №44330 токамака Глобус-М2.

(Средний нижний график) Интенсивность излучения дейтериевой линии D_α , измеренная по вертикальной хорде $R=50$ см (чёрная линия) и энергия плазмы (красная линия).

(Нижний график) Спектрограмма сигнала магнитного зонда (черный цвет), интеграл спектральной мощности от 50 кГц до 500 кГц (Int. SD., чёрная кривая). Вертикальные линии обозначают моменты времени, соответствующие внутренним перезамыканиям.

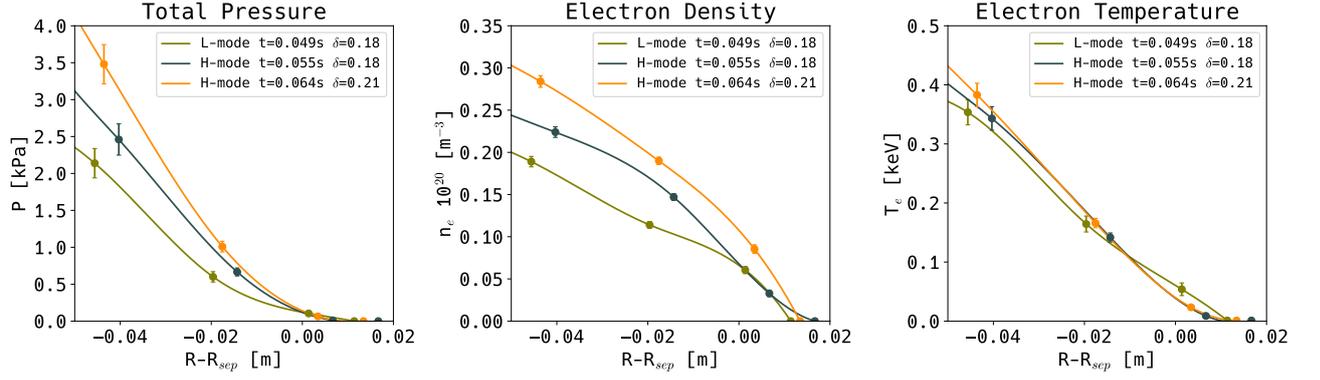


Рис. 8: (Левый график) Профиль полного давления краевой плазмы, в предположении $P = 2P_e$, для разряда №44330 токамака Глобус-М2 в случае с различными треугольностями, измеренный диагностикой томсоновского рассеяния.

(Средний график) Профиль концентрации электронов краевой плазмы для описанного разряда.

(Правый график) Профиль температуры электронов краевой плазмы для описанного разряда.

личие десинхронизированных краевых неустойчивостей при относительно низких значениях давления в краевой плазме ($P \approx 1.5$ кПа). В разрядах с треугольностью около $\delta \approx 0.3$ десинхронизированные краевые неустойчивости наблюдаются при давлении не менее $P \approx 3 - 4$ кПа. Данные измерения указывают на дестабилизирующее влияние низкой треугольности плазменного шнура на пилинг-баллонную устойчивость краевой плазмы, так как ранее было показано, что десинхронизированные краевые неустойчивости проявляются при достижении границы стабильности пилинг-баллонной моды.

Проверка гипотезы о дестабилизации ПБ моды при низких давлениях была проведена с помощью вычислений МГД кодом VOUT++. Ниже представлены диаграммы устойчивости для низких и средних значений треугольности плазменного шнура, соответствующим разрядам с током плазмы $I_P = 0.3$ МА и магнитным полем на оси $B_T = 0.7$ Тл.

Краевая плазма для равновесия с низкой и средней треугольностью демонстрирует в 3-4 раза более низкие значения высоты пьедестала необходимые для дестабилизации пилинг-баллонной моды (Рисунок 9), чем в случае с высокой треугольностью (Рисунок 4). Наиболее неустойчивая мода для разрядов с низкой треугольностью имеет тороидальные модовые числа $n = 4$, инкремент которой слабо зависит от ширины пьедестала, что указывает на доминирующее влияние пилинг неустойчивости. Следовательно, понижение треугольности плазменного шнура приводит к дестабилизации пилинг моды и последующему появлению десинхронизированных неустойчивостей при значениях давления краевой плазмы значительно ниже, чем в случае с высокой треугольностью плазменного шнура.

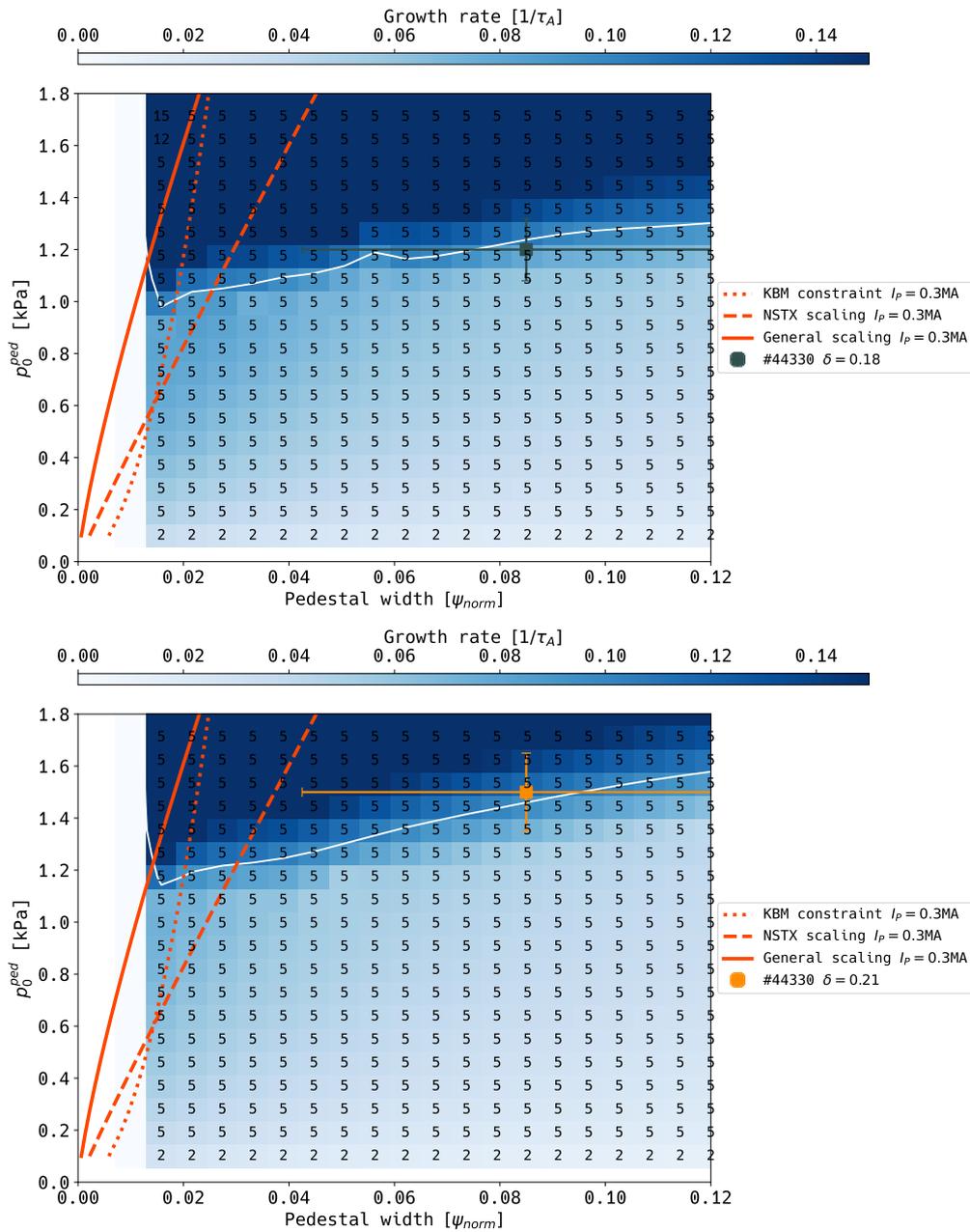


Рис. 9: Диаграмма устойчивости от ширины пьедестала в потоковых координатах (ось абсцисс) и от высоты пьедестала (ось ординат) для разряда Глобус-М2 №44330 для $\delta = 0.18$ (верхний график) и $\delta = 0.21$ (нижний график). Ограничение кинетической баллонной моды показано мелко-пунктирной линией, скейлинг ширины пьедестала для токамака NSTX показан пунктирной линией, обобщённый скейлинг показан сплошной линией. Экспериментальные значения высоты и ширины пьедестала показаны маркерами: тёмно-синий цвет соответствует фазе разряда №44330 с треугольностью $\delta = 0.18$, оранжевый цвет соответствует фазе с треугольностью $\delta = 0.21$. Цифрами обозначено тороидальное модовое число наиболее неустойчивой моды. Положение границы устойчивости с инкрементом 0.1 τ_A^{-1} обозначено белой линией.

В **заключении** приводятся результаты проведённых исследований краевых неустойчивостей, обобщение результатов проведенных экспериментов и численного моделирования.

Исследования проводились на сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2, построенных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Глобус-М и Глобус-М2 являются компактными сферическими

токамаками с большим радиусом $R = 0.36$ м и малым радиусом $a = 0.24$ м, соответственно, аспектное отношение токамаков составляет $A = 1.5$. Основным отличием токамака Глобус-М2 от Глобус-М является двукратно увеличенное магнитное поле до значений $B_T = 0.95$ Тл. Моделирование развития краевых неустойчивостей было выполнено с помощью решения системы уравнений магнитной гидродинамики в тороидальной геометрии кодом VOUT++.

Анализ краевых неустойчивостей на токамаке Глобус-М показал, что большинство наблюдаемых краевых неустойчивостей было синхронизировано с внутренними перезамканиями. Характерные задержки между внутренними перезамканиями и краевыми неустойчивостями составляют около 150 мкс, что обуславливает необходимый для наблюдения инкремент краевой неустойчивости равный одной десятой обратного альвеновского времени. Было зафиксировано давление в краевой плазме в точке $\psi_n \approx 0.8$ равное 0.7 кПа, недостаточное для дестабилизации пилинг-баллонной моды.

На токамаке Глобус-М2 были обнаружены краевые неустойчивости развивающиеся независимо от внутренних перезамканий в разрядах с током плазмы более 0.3 МА. Было показано, что обнаруженные краевые неустойчивости относятся к третьему или пятому типу. Развитие краевых неустойчивостей наблюдалось при достижении давления в краевой плазме в точке $\psi_n \approx 0.8$ более 4 кПа и пятикратном падении интенсивности флуктуаций скорости в краевой плазме.

Моделирование развития пилинг-баллонной моды в краевой плазме токамака Глобус-М показали, что пилинг-баллонная мода устойчива для рабочих параметров токамака. Основным стабилизирующим фактором выступает низкое давление в краевой плазме. Ширина пьедестала токамака Глобус-М превышает значения скейлингов для классических и сферических токамаков. Было показано, что влияние полоидального вращения плазмы на устойчивость в токамаке Глобус-М пренебрежимо мало.

Предложена гипотеза, связывающая развитие краевых неустойчивостей с возникновением дополнительной плотности тока в краевой плазме и дестабилизацией пилинг-баллонной моды. Дополнительная плотность тока со значениями $j^{ind} = 80$ кА/м² в области потоковых координат $\psi_n = 0.70 - 0.95$ повышает инкремент краевой неустойчивости до $0.1 \tau_A^{-1}$.

Расчёты инкремента пилинг-баллонной неустойчивости для токамака Глобус-М2 показали, что краевые неустойчивости, независимые от внутренних перезамканий, развиваются в условиях близких к границе устойчивости для пилинг-баллонной моды. Тороидальное число наиболее неустойчивой моды для рассмотренных случаев $n \approx 4 - 14$, что соответствует дестабилизации пилинг ветви пилинг-баллонной моды.

Впервые в мире было изучено равновесие краевой плазмы сферических токамаков в конфигурациях с низкой треугольностью и магнитным полем B_T более 0.6 Тл. Проведённые эксперименты, показали, что при понижении треугольности от значения $\delta = 0.36$ до $\delta = 0.20$ снижается давление в краевой плазме, необходимое для наблюдения независимых краевых неустойчивостей с 4.0 кПа до 1.3 кПа. Высота пьедестала в разрядах с низкой треугольностью ограничена пилинг-баллонной модой.

Проверенная на токамаках Глобус-М/М2 модель была использована для анализа устой-

чивости краевой плазмы проекта токамака Глобус-3. В результате расчётов было показано, что при токе по плазме 0.8 МА и магнитном поле 1.8 Тл пилинг-баллонная мода будет дестабилизироваться при давлениях в пьедестале около 5-6 кПа. При этом тороидальные модовые числа наиболее неустойчивой моды выше, чем для Глобус-М2, что позволяет ожидать дестабилизацию краевой неустойчивости первого типа. Увеличение тока по плазме до 2.0 МА позволит увеличить ожидаемые давления в краевой плазме до 15-17 кПа за счёт понижения магнитного шира в краевой плазме и достижения второй области устойчивости баллонной моды.

Перспективы дальнейших исследований предполагают использование валидированных предсказательных моделей, описанных в диссертации, для оптимизации формы плазменного шнура в токамаке Глобус-3 с целью достижения наиболее устойчивого пьедестала, и использовании полученной информации для разработки и оптимизации конфигурации электромагнитной системы токамака. Другим направлением развития является имплементация двухжидкостной нелинейной модели для анализа процесса срыва краевой неустойчивости и поиска условий для минимизации потерь энергии и частиц из пьедестала токамака.

Список литературы

- [1] G.S. Kurskiev и др. “The first observation of the hot ion mode at the Globus-M2 spherical tokamak”. В: *Nuclear Fusion* 62.10 (сент. 2022), с. 104002. DOI: 10.1088/1741-4326/ac881d.
- [2] M. Gryaznevich и др. “Achievement of Record β in the START Spherical Tokamak”. В: *Phys. Rev. Lett.* 80 (18 май 1998), с. 3972—3975. DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.3972.
- [3] BD Dudson и др. “BOUТ++: A framework for parallel plasma fluid simulations”. В: *Computer Physics Communications* 180.9 (2009), с. 1467—1480.
- [4] VK Gusev и др. “First results on H-mode generation in the Globus-M spherical tokamak”. В: *34th EPS Conference on Plasma Physics 2007, EPS 2007-Europhysics Conference Abstracts*. 2007, с. 460—463.
- [5] Hartmut Zohm. “Edge localized modes (ELMs)”. В: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 38.2 (1996), с. 105.
- [6] PB Snyder и др. “A first-principles predictive model of the pedestal height and width: development, testing and ITER optimization with the EPED model”. В: *Nuclear Fusion* 51.10 (2011), с. 103016.
- [7] Alexander Yashin и др. “Review of Advanced Implementation of Doppler Backscattering Method in Globus-M”. В: *Applied Sciences* 11.19 (2021), с. 8975.
- [8] S.A. Galkin и др. “Comparison of tokamak axisymmetric mode growth rates from linear MHD and equilibrium evolution approaches”. В: *Nuclear Fusion* 37.10 (окт. 1997), с. 1455. DOI: 10.1088/0029-5515/37/10/I11.
- [9] JW Connor, CJ Ham и RJ Hastie. “The effect of plasma beta on high-n ballooning stability at low magnetic shear”. В: *Plasma Physics and Controlled Fusion* 58.8 (2016), с. 085002.