

*На правах рукописи*



**Алейникова Ксения Олеговна**

**КИНЕТИЧЕСКИЕ БАЛЛОННЫЕ МОДЫ В ПЛАЗМЕ  
ТОКАМАКА И СТЕЛЛАРАТОРА**

специальность 01.04.08 — Физика плазмы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Москва — 2018**

Работа выполнена на кафедре физики и химии плазмы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

**Научный руководитель** **Коновалов Сергей Владимирович**  
кандидат физико-математических наук,  
начальник отдела теории плазмы  
Курчатовского комплекса термоядерной  
энергетики и плазменных технологий  
ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт».

**Официальные оппоненты** **Мартынов Александр Александрович**  
кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
ИПМ им. М.В. Келдыша;  
**Зайцев Федор Сергеевич**  
доктор физико-математических наук, МГУ  
им.М.В. Ломоносова, профессор факультета  
вычислительной математики и кибернетики.

**Ведущая организация** Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»), г. Москва г. Троицк.

Защита состоится 21 ноября 2018 года, начало в 17.00, на заседании диссертационного совета Д 520.009.02 в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» по адресу: г. Москва, площадь Академика Курчатова, д. 1 .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте <http://www.nrcki.ru>.

С авторефератом можно ознакомиться на сайте <http://www.nrcki.ru>.

Автореферат разослан 2018 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Демура А.В.

# Общая характеристика работы

## Актуальность проблемы.

В настоящее время существует и строится большое количество экспериментальных установок с магнитным удержанием плазмы для осуществления термоядерного синтеза. На данном этапе изучение поведения плазмы в условиях, близких к термоядерным (что означает: высокие температуры и, соответственно, давление) является ключевым. Именно поэтому современные установки переходят к большим  $\beta = 8\pi p/B^2$  (отношение двух давлений: плазменного и магнитного), что выдвигает на первый план изучение неустойчивостей, возникающих и развивающихся в данных условиях.

В частности актуальной становится задача увеличения времени удержания плазмы при повышении давления. А именно: повышение давления плазмы может являться причиной дестабилизации кинетических баллонных мод, а возникновение и эволюция подобных неустойчивостей увеличивают потери энергии из плазмы, что в свою очередь ограничивает время жизни плазмы. Таким образом, вопрос о предельной величине параметра  $\beta$ , при котором начинают развиваться данные неустойчивости, является критическим для создания термоядерного реактора.

В проектировании установок нового поколения в силу сложности и многообразия физических процессов в плазме зачастую приходится опираться на полуэмпирические модели с экстраполяцией существующих экспериментальных данных. Однако стоит учитывать ограниченность подобного рода методик. Поэтому особенную важность имеет теоретическое исследование кинетических баллонных мод, а также численное моделирование плазмы на устойчивость с учетом влияния профилей давления плазмы, а также зависимостью от них инкремента роста соответствующих неустойчивостей.

# 1 Введение

В тороидальной термоядерной установке кривизна удерживающего магнитного поля и градиент давления плазмы вызывают дестабилизацию гидромагнитных мод с большими длинами волн вдоль и малыми длинами волн поперек магнитного поля. Характер дестабилизации данного типа неустойчивостей, неразрывно связанный с магнитным полем и градиентами давления, делает такие неустойчивости весьма распространенными. Тороидальные неустойчивости с высоким числом  $n$  впервые были успешно изучены в рамках идеальной магнитогидродинамической (МГД) модели с использованием баллонного преобразования [1]. Добавление кинетических эффектов в данную теорию делает ее более полной и приводит к изучению, так называемых, кинетических баллонных мод (КБМ) [2, 3]. Уравнения, описывающие кинетические баллонные моды, были впервые описаны в работах Антонсена и Лейна [2], а также Танга, Коннора и Хаста [3]. Однако сложная структура этих уравнений, препятствует аналитическому изучению КБМ неустойчивости.

Кинетические баллонные моды обычно наблюдаются при конечных (не малых) значениях  $\beta$  в гирокинетическом численном моделировании при тех же условиях (за исключением  $\beta$ ), которые обеспечивали бы дестабилизацию электростатической ионной температурно-градиентной (ИТГ, Ion Temperature Gradient) моды [4, 5, 6].

В этом контексте параметр  $\beta = 8\pi p/B^2$ , отношение плазменного к магнитному давлению, является важной мерой электромагнитных эффектов. Типичная  $\beta$ -зависимость этих неустойчивостей проиллюстрирована на Рис.1, где показан инкремент роста самой неустойчивой моды, полученный с помощью линейного гирокинетического моделирования. Электростатическая мода ИТГ ( $\beta = 0\%$ ) частично стабилизируется с увеличением  $\beta \sim 1\%$ . При больших  $\beta$  дестабилизируется длинноволновая мода КБМ.

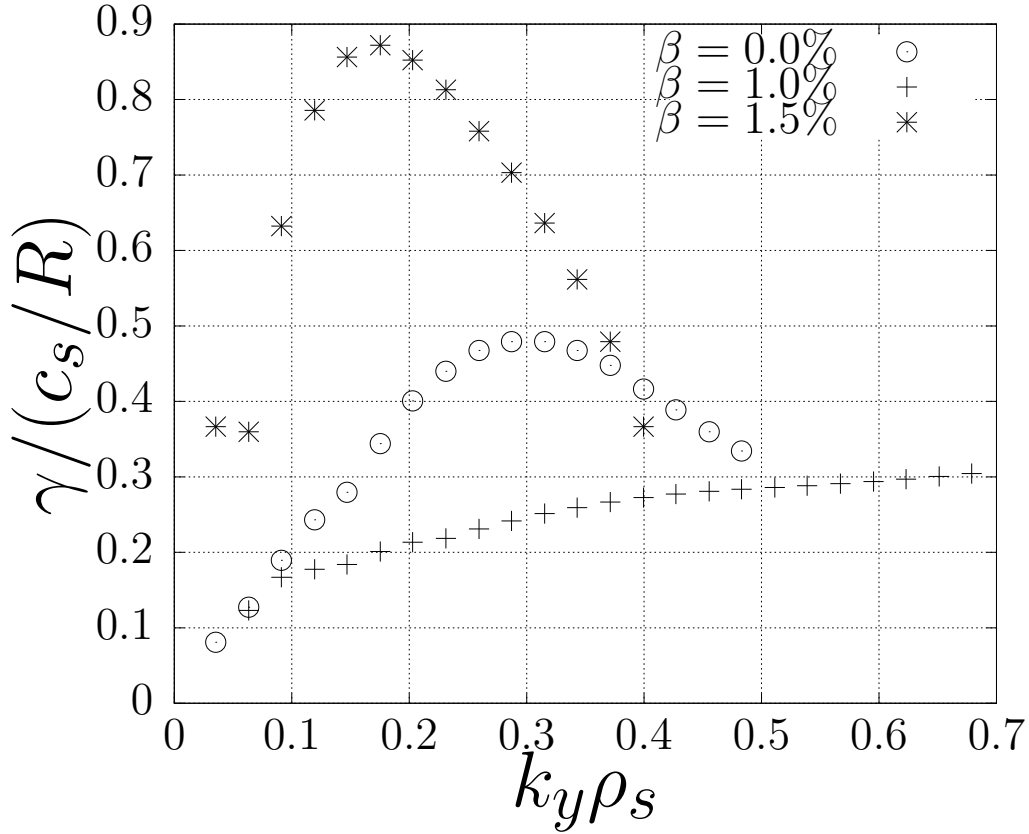


Рис. 1: Типичные спектры микронеустойчивостей при повышении плазменного  $\beta$ . От электростатической ITG моды ( $\beta = 0\%$ ) до КБМ ( $\beta = 1.5\%$ ). Здесь  $\gamma$  - инкремент роста,  $k_y \rho_s$  - длина волны моды, где  $\rho_s$  - ионный ларморовский радиус.

Существует большое количество научной литературы, охватывающей многие аспекты микронеустойчивостей в термоядерной плазме с конечными  $\beta$ . Так, в 1982 году Чэнг [7] был одним из первых, указавших на то, что эффекты магнитного дрейфового резонанса приводят к уменьшению порогового значения  $\beta$  для дестабилизации КБМ. В 1981 году Хасти и Хескет [8] также исследовали эффекты магнитного дрейфового резонанса. Их анализ касался так называемой «первой» [1, 9] и «второй» [10, 11] границ идеальной МГД-устойчивости. Дальнейшие исследования кинетических эффектов на второй границе идеальной МГД устойчивости были представлены Хиросе и др. [12, 13]. Во всех этих исследованиях пренебрегали эффектом ионно-транзитного резонанса. Этот эффект был введен в работах Цай и Чена, которые подчеркивали роль частоты моды в процессе дестабилизации [14]. Обзор влияния быстрых частиц на Альвеновские моды приведен в работе [15]. Широкий анализ этих резонансных эффектов, а также других кинетических

аспектов был выполнен Бирваге и др. [16, 17]. Их работа основывается на кодах, ищущих собственные значения. Также имеется значительное количество статей, в которых КБМ исследуются численно, с использованием гирокинетических кодов, решающих начальную задачу, либо эйлеровым методом [18, 19, 20, 21], либо методом частиц в ячейке [22, 23].

На сегодняшний день не ясно, в каких случаях гирокинетическое моделирование электромагнитной температурно-градиентной микронеустойчивости, основанное на решении начальной задачи, дает результаты, сопоставимые с теорией идеальных баллонных мод. Цель этой работы - пролить свет на этот вопрос.

**Основными задачами** диссертационной работы являются:

1. Поиск малых параметров, позволяющих значительно упростить классическое уравнение баллонных мод.
2. Исследование пределов применимости полученного упрощенного уравнения кинетических баллонных мод.
3. Верификация результатов, полученных с помощью кода GENE [24, 25] с результатами кода GS2 [26, 27].
4. Разработка программного модуля для расчета инкремента роста и частоты КБМ неустойчивости на основе полученного уравнения и сравнение полученных результатов с результатами гирокинетических кодов GENE и GS2.
5. Изучение влияния параметров плазмы на КБМ неустойчивость.
6. Сравнение порога возникновения КБМ неустойчивости для разных конфигураций стелларатора Wendelstein 7-X.
7. Изучение и сравнение поведения ионной температурно-градиентной (ITG, Ion Temperature Gradient) моды, моды запертых электронов

(ТЕМ, Trapped Electron Mode) и КБМ в геометриях токамака и стелларатора.

8. Самосогласованный анализ вертикальных смещений плазмы при срывах разряда (вертикальной неустойчивости) с генерацией убегающих электронов и последующего развития магнитогидродинамических неустойчивостей.

## **Цели настоящего исследования**

1. Разработка упрощенной теории классических баллонных мод (КБМ, Kinetic Ballooning Modes).
2. Определение предельных параметров плазмы, в которых gyroкинетическое моделирование кинетической баллонной неустойчивости, дает результаты, сопоставимые с теорией идеальных баллонных мод.
3. Последовательное численное исследование характеристик кинетических баллонных мод в геометрии стелларатора Wendelstein 7-X, в том числе: их инкрементов роста, частот и длин волн.
4. Определить критические значения параметра  $\beta$  для дестабилизации КБМ в разных конфигурациях стелларатора Wendelstein 7-X.
5. Определить для заданного набора магнитных конфигураций Wendelstein 7-X какая из неустойчивостей (КБМ или МГД) накладывает более строгое ограничение на рост параметра  $\beta$ .
6. Рассмотреть эволюцию различных сценариев VDE (Vertical Displacement Event, вертикальное смещение плазмы) в ИТЭР и проанализировать возникающую в них МГД активность.

## **Научная новизна и практическая ценность**

1. Разработана новая методика решения общего уравнения кинетических баллонных мод и найдены границы ее применимости.

2. Было выполнено последовательное численное исследование влияния параметров плазмы на характеристики кинетических баллонных мод, определены их инкременты роста, частоты и длины волн.
3. Впервые были получены и проанализированы пороговые значения  $\beta$  для дестабилизации кинетической баллонной моды для стелларатора Wendelstein 7-X.
4. Аналитически и численно было показано, что появление КВМ неустойчивости возможно раньше, чем дестабилизация соответствующей идеальной МГД неустойчивости. Таким образом, именно КВМ оказывается неустойчивостью, которая ограничивает рост параметра  $\beta$ .
5. Для численных расчетов КВМ, показана необходимость согласованного расчета равновесной конфигурации с вариацией параметров исследуемой плазмы.
6. Разработаны численные алгоритмы для самосогласованного моделирования неуправляемого движения плазмы по вертикали с анализом эволюционирующей равновесной конфигурации на МГД устойчивость.

**Практическая значимость:** полученные результаты позволяют охарактеризовать параметры плазмы в стеллараторе и токамаке, способствующие достижению максимальных давлений до начала развития КВМ. При этом разработанная аналитическая теория позволяет существенно сократить затраты компьютерного времени при анализе на КВМ и обозначить границы поиска данной неустойчивости. Эта работа может быть востребована при планировании экспериментов и интерпретации диагностических данных.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Новый аналитический подход к общему уравнению кинетической баллонной моды, в пределах как малых, так и больших  $\beta$ , позволяющий рассмотреть данное уравнение в двух режимах: с «высокими» и «умеренными» температурными градиентами.



2. Для геометрии токамака с малым широм аналитически показано, что дестабилизация КВМ может происходить как до, так и после дестабилизации соответствующей идеальной МГД неустойчивости.
3. Пороговые значения  $\beta$  для дестабилизации кинетической баллонной моды в геометрии стелларатора Wendelstein 7-X.
4. В стеллараторе Wendelstein 7-X, численно показано, что с ростом давления плазмы КВМ неустойчивость может возникнуть раньше, чем появится идеальная МГД неустойчивость.
5. Продемонстрирована необходимость учета продольных флуктуаций магнитного поля в численных расчетах КВМ.

### **Публикации, апробации работы и достоверность полученных результатов.**

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. 45-я Европейская конференция по физике плазмы (EPS), Прага, Чешская Республика, 2018.
2. 82-я Конференция немецкого физического сообщества (DPG), Эрланген, Германия, 2018.
3. 17-я Европейская конференция теории физики плазмы (EFTC), Афины, Греция, 2017.
4. 81-я Конференция немецкого физического сообщества (DPG), Бремен, Германия, 2017.
5. 80-я Конференция немецкого физического сообщества (DPG), ГанOVER, Германия, 2016.
6. 42-я Европейская конференция по физике плазмы (EPS), Лиссабон, Португалия, 2015.

Основные результаты опубликованы в работах (1-7) стр. 20 (в том числе 5 работ в изданиях из перечня ведущих периодических изданий ВАК).

**Личный вклад автора.** Автором лично или при его непосредственном участии выполнены все теоретические изыскания. Все численные расчеты выполнены и проанализированы непосредственно автором.

**Структура диссертации и объем работы.** Диссертация изложена на 118 страницах машинописного текста и состоит из 3-х глав, введения, заключения и списка литературы, включающего 113 источников. Диссертация иллюстрирована 36 рисунками.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность работы, обозначены основные цели и задачи, а также описана история исследования идеальных и кинетических баллонных мод и охарактеризованы методы их исследования.

**В первой главе,** кинетические баллонные моды (КБМ) были изучены аналитически в упрощенной геометрии тороидальной плазмы и численно с помощью gyrokinetic моделирования. Было показано, что при соответствующих малых параметрах, найденных в данной работе, классическое уравнение кинетических баллонных мод можно значительно упростить. Глава основана на публикации [28].

Мы ввели вариационный подход, позволяющий получить явное дисперсионное соотношение. Аналитические результаты были проверены линейными вычислениями кода GENE, которые также были проверены с помощью кода GS2; было продемонстрировано превосходное согласие аналитических и численных результатов.

Результаты теоретического анализа кинетической баллонной неустойчивости и их сопоставление с численными результатами привели к выделению

двух режимов КБМ: с «высоким температурным градиентом» и «умеренным температурным градиентом». Также было показано, что частота моды  $\omega_r$  играет важную роль в идентификации этих режимов.

При  $\beta = 1.5\%$ ,  $q = 1.4$ ,  $R/L_{ni,e} = 2.22$  and  $R/L_{Ti,e} = 35, 40, 45$ , инкременты роста кинетических баллонных мод, полученные с помощью кода GENE (сплошные кривые) и с использованием вариационного подхода, показаны на Рис.2,  $q$  - коэффициент запаса по устойчивости,  $R$  - большой радиус,  $L_{Ti,e}$  и  $L_n$  - характерные длины градиента для температуры и плотности,  $T_{i,e}$  - ионная и электронная температура. Заметим, что  $\omega_r$  является вещественной частью комплексной частоты  $\omega$ .

Для больших температурных градиентов неустойчивость возникает только тогда, когда  $\omega_r = \omega_{pi}/2$ . Максимальный инкремент роста неустойчивости наблюдается для очень большой длины волны (малых  $k_y$ ). В этом случае, если магнитные дрейфы задаются в соответствии с равновесным градиентом давления, гирокинетические коды показывают превосходное количественное согласие с идеальным МГД уравнением с диамагнитной поправкой, полученным с учетом большой  $\beta$ . Это обобщает электромагнитную теорию ИТГв работе Зокко [29], которая была получена для  $\beta \sim \varepsilon^2$  и совпадает с нашей моделью для  $\eta_i \gg 1$ . Здесь  $\varepsilon = v_{thi}^2/\omega^2 l_c^2 \ll 1$  - малый параметр, где  $v_{thi}$  ионная тепловая скорость,  $l_c$  длина пересоединения и  $\omega$  частота моды.

Для умеренных температурных градиентов мы наблюдаем, что частота моды стремится к значению  $\omega_{pi} > \omega_r > \omega_{pi}/2$ . Инкремент роста теперь, в отличие от случая больших температурных градиентов, достигает максимума при конечных (не нулевых)  $k_y$ . Этот режим хорошо описывается уравнением, где включены все поправки, связанные как с большим  $\beta \sim \varepsilon$ , так и с  $b \sim \varepsilon$  ( $b = k_y^2 \rho_s^2/2$ ), что особенно важно для конечных  $k_y$ . Решение данного уравнения (с поправками второго порядка) показывает хорошее соответствие инкрементам роста, полученным с помощью кода GENE, и правильную тенденцию изменения частоты моды.

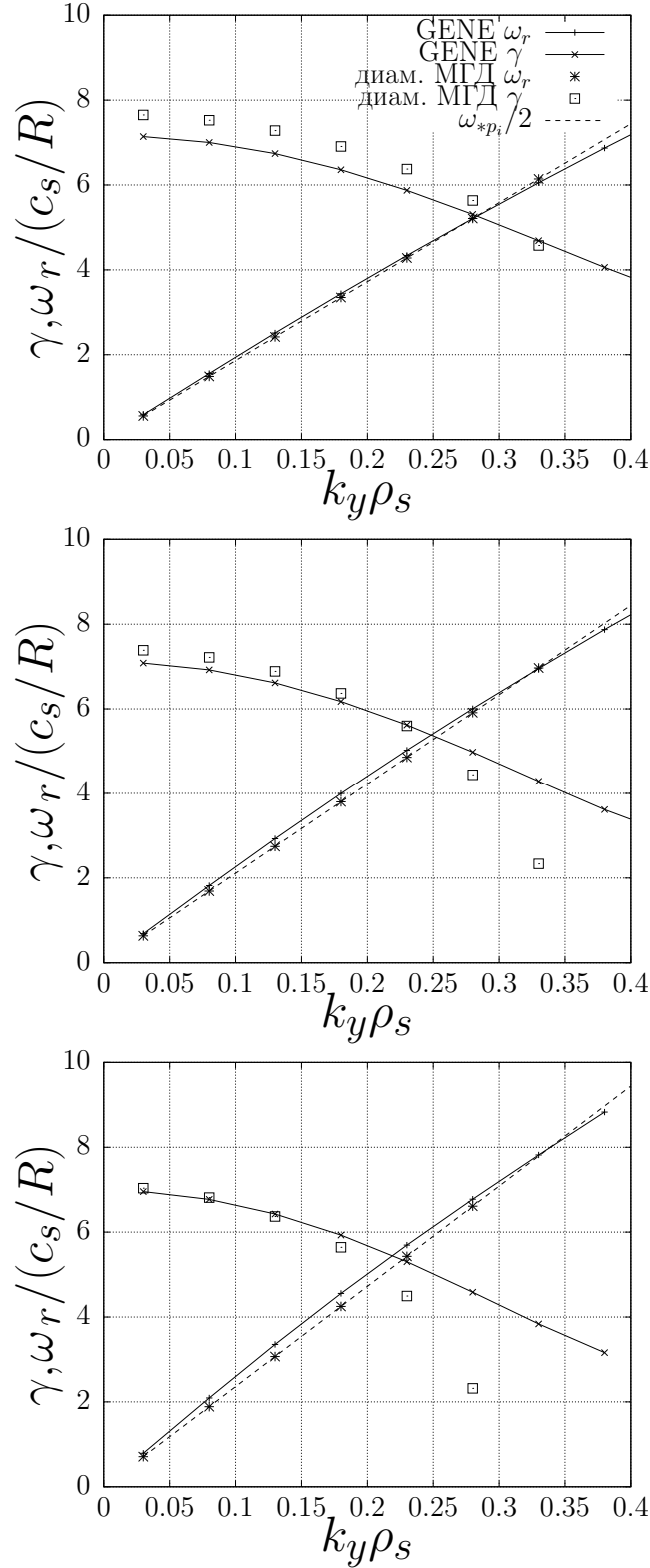


Рис. 2: Спектры для  $R/L_{Ti,e} = 35, 40, 45$ , сверху вниз, соответственно. На графике представлены полученные с помощью GENE  $\gamma$ : сплошная кривая ( $\times$ ) и  $\omega_r$ : сплошная кривая ( $+$ ), а также представлены результаты, полученные при решении идеального МГД уравнения с диамагнитной поправкой ( $\gamma$  – квадраты и  $\omega_r$  – звезды). Штриховая линия представляет частоту  $\omega_{*pi}/2$ .

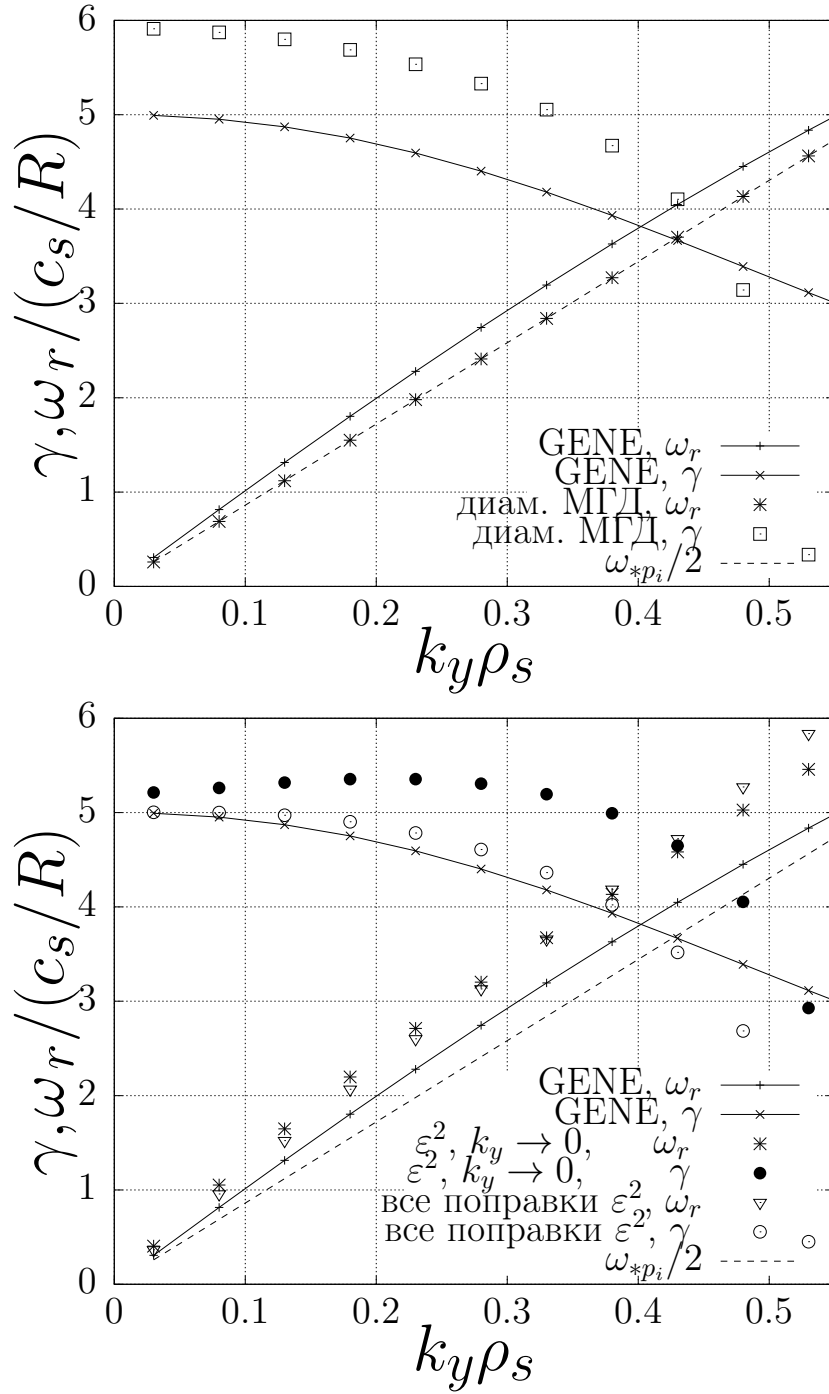


Рис. 3: Спектр для  $R/L_{Ti,e} = 15$ . На верхнем графике представлены полученные с помощью GENE  $\gamma$ : сплошная кривая (x) и  $\omega_r$ : сплошная кривая (+), а также представлены результаты, полученные при решении идеального МГД уравнения с диамагнитной поправкой ( $\gamma$  - квадраты и  $\omega_r$  - звезды). На нижнем графике представлены результаты, полученные при решении длинноволнового предела уравнения с поправками второго порядка ( $\gamma$  - закрашенные точки и  $\omega_r$  - звезды) и уравнения, включающего поправки второго порядка, связанные как с  $\beta$ , так и с  $b$  ( $\gamma$  - пустые точки и  $\omega_r$  - треугольники). Штриховая линия представляет частоту  $\omega_{*pi}/2$ .

**Во второй главе,** линейное электромагнитное гирокинетическое моделирование кинетических баллонных мод и других микронеустойчивостей было выполнено с помощью кода GENE в плазме с конечными  $\beta$  для разных конфигураций геометрии в стеллараторе Wendelstein 7-X, а также в общей геометрии токамака. Глава основана на публикациях [28, 31, 32].

Было показано, что частоты КБМ, полученные численно для режима с большими градиентами температур в геометрии Wendelstein 7-X, хорошо согласуются с частотами КБМ, аналитически предсказанными идеальным МГД уравнением с диамагнитной поправкой. Данный результат согласуется с результатами исследования КБМ в упрощенной геометрии токамака, представленными в первой главе.

Пороговые значения  $\beta$  для дестабилизации кинетических баллонных мод в конфигурациях Wendelstein 7-X с различными свойствами идеальной МГД устойчивости были проанализированы и была найдена определенная коррекция. Численное моделирование неустойчивости КБМ в стандартной (МГД-оптимизированной) геометрии Wendelstein 7-X с плоским профилем плотности и градиентом температуры  $a/L_{Ti,e} = 2$  показывает, что порог устойчивости КБМ ( $k_y \rho_s = 0,05$ ) составляет около 2,2% (для трубки магнитного потока, с центром в наружном крае средней плоскости, так называемой, «треугольной» плоскости.) и 1,9% (для "бобовидной") по сравнению с 0,65% в не оптимизированной конфигурации, которая имеет значительно более низкий порог МГД устойчивости. Критические значения  $\beta$  для КБМ, соответствующие точке пограничной стабильности, сравнивались с референсными МГД-оценками, полученными с помощью идеального баллонного кода, и оказались ниже МГД в случае конфигурации КЖМ. Таким образом, мы заключаем, что мы можем ожидать появления КБМ неустойчивости раньше, чем появится соответствующая идеальная МГД неустойчивость.

Сравнение стелларатора Wendelstein 7-X и токамака показывает, что одной из существенных особенностей КБМ в геометрии Wendelstein 7-X является

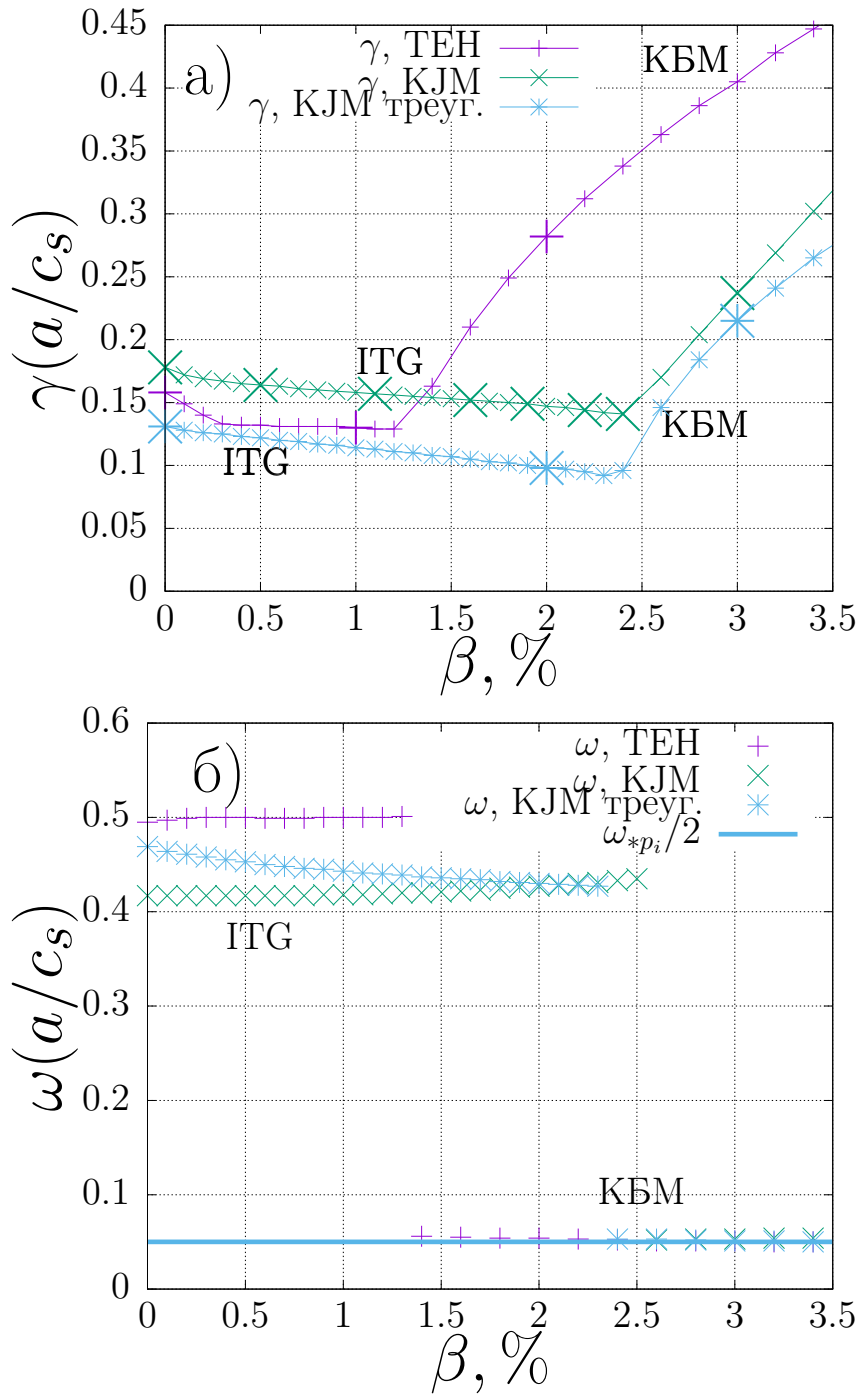


Рис. 4: Зависимость от  $\beta$  для наиболее быстро растущей моды,  $a/L_{Ti,e} = 2$  и  $k_y \rho_s$  в диапазоне от 0,05 до 0,8, для двух разных конфигурациях Wendelstein 7-X (КJM и ТЕН) и двух симуляционных трубок ("бобовидной" и "треугольной"). (а): инкремент роста неустойчивостей. (б): соответствующая частота мод. Большие (по отношению к остальным) точки указывают, где изменялось магнитное равновесие.

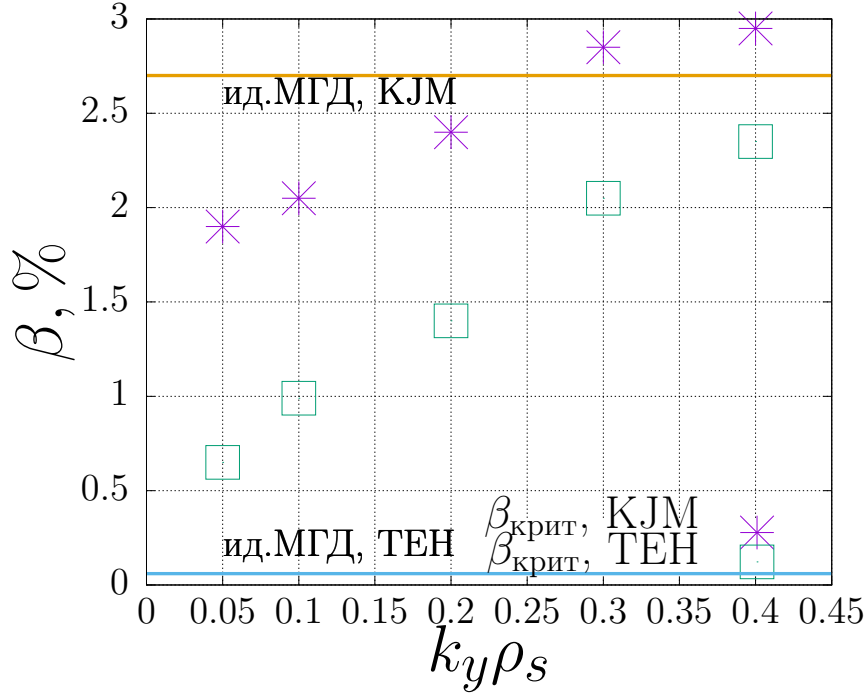


Рис. 5: Критические значения  $\beta$ , соответствующие точке пограничной устойчивости КБМ (см. текст). Оценочные значения для соответствующих идеальных МГД неустойчивостей, полученные с помощью идеального баллонного МГД кода, представлены в виде линий.

ся то, что наиболее неустойчивая мода имеет  $k_y \rightarrow 0$  для широкого диапазона параметров численного моделирования. В конфигурации токамака наиболее неустойчивая мода, ближе к пограничной устойчивости, имеет конечный  $k_y \rho_s$ . В Wendelstein 7-X ITG мода постепенно подавляется с увеличением  $\beta$ , но не стабилизируется полностью, как это происходит в случае токамака, где мы наблюдаем более значительную стабилизацию ITG моды с увеличением  $\beta$ , а также более неустойчивые КБМ (пороговое значение:  $\beta = 2.1\%$ ). Мы заключаем, что представленная стандартная конфигурация (КJM) стелларатора Wendelstein 7-X оказывается более стабильной, чем стандартная конфигурация токамака по отношению к мода с малыми  $k_y$ , включая КБМ.

Было показано, что во всех численных расчетах важно, чтобы геометрия магнитного равновесия соответствовала меняющемуся градиенту давления. В связи с этим, была разработана методика анализа плазмы на различные неустойчивости, заключающаяся в согласованном использовании кодов равновесия плазмы с кодами, рассчитывающими устойчивость плазмы. В следующей главе, проводится верификация данного метода согласованного ана-



лиза плазмы на примере анализа неуправляемого движения шнура плазмы в камере токамака при срывах разряда и последующего возникновения МГД неустойчивостей.

**В третьей главе**, мы оцениваем влияние возможных параметров затравки тока убегающих электронов (УЭ) на начало МГД-неустойчивости в плазме строящегося токамака ИТЭР. Во время срывов плазмы в ИТЭР возможно, что большая часть плазменного тока может быть заменена током убегающих электронов. МГД-активность такой плазмы будет влиять на генерацию и удержание убегающих электронов и динамику положения плазмы (вертикального смещения), ограничивая временные рамки для подавления срыва шнура УЭ в подобной плазме. Изменяя профиль затравки тока УЭ, мы анализируем дальнейшую эволюцию плазмы с точки зрения возникающей в ней МГД-активности. Эта информация может быть применена к разработке сценариев работы системы смягчения последствий срыва разряда в ИТЭР. Глава основана на публикациях [33, 34, 35, 36].

Мы рассмотрели следующие случаи:

- Случай 1 -  $w = 0.5$ ,  $I_{\text{затравки}} = 1.5 \text{ МА}$ ;
- Случай 2 -  $w = 0.5$ ,  $I_{\text{затравки}} = 50 \text{ кА}$ ;
- Случай 3 -  $w = 0.5$ ,  $I_{\text{затравки}} = 500 \text{ А}$ ;
- Случай 4 -  $w = 0.3$ ,  $I_{\text{затравки}} = 50 \text{ кА}$ ;
- Случай 5 -  $w = 0.9$ ,  $I_{\text{затравки}} = 50 \text{ кА}$ ;
- Случай 6 -  $w = 0.9$ ,  $I_{\text{затравки}} = 1.5 \text{ МА}$ .

Случаи с 1 по 3 представляют собой сканирование по амплитуде затравочного тока с одинаковой начальной шириной профиля, в то время как в случаях 4, 2 и 5 возрастает ширина профиля затравки, но амплитуда сохраняется одинаковой (достаточно умеренной). Случай 6 представляет собой отдельно

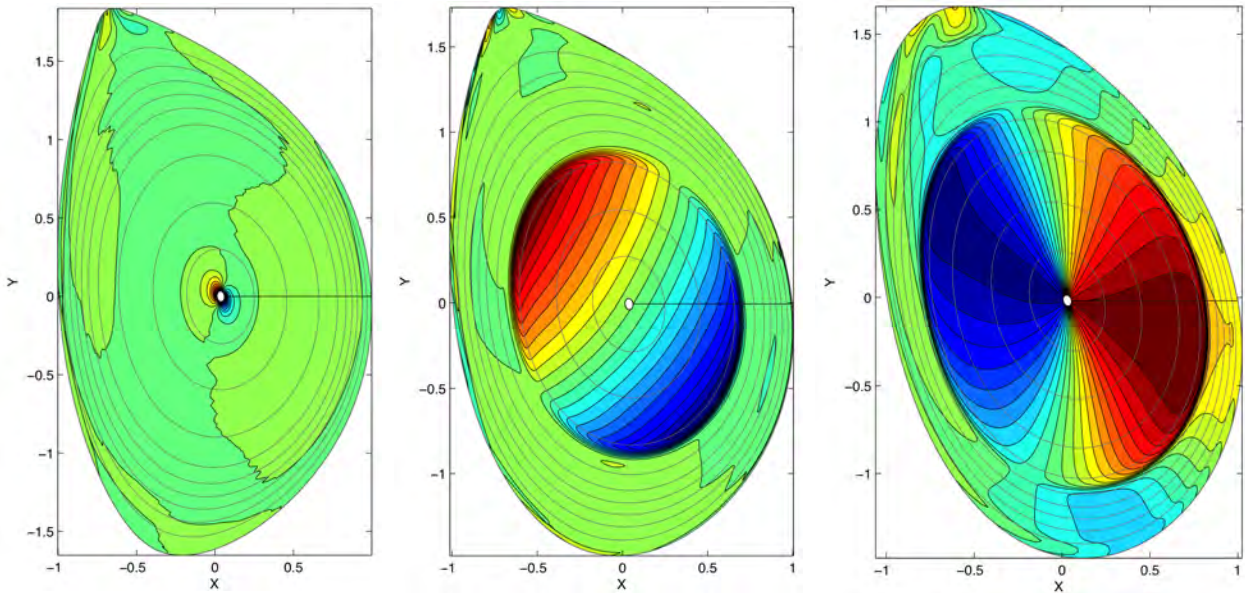


Рис. 6: Эволюция внутренней винтовой неустойчивости в процессе VDE для случая 2,  $I_{seed} = 50 \text{ кА}$ ,  $w = 0,5$  (цвет показывает нормализованное смещение возмущения в полоидальной плоскости.) Слева направо - 90 мс, 100 мс, 115 мс. Ось нормирована на  $a$  (малый радиус),  $a_{90\text{мс}} = 1,65\text{м}$ ,  $a_{100\text{мс}} = 1,48\text{м}$ ,  $a_{115\text{мс}} = 1,32 \text{ м}$ .

стоящий случай, когда очень высокий ток начальной заправки имеет очень широкий профиль.

В этой главе мы изучили развитие как идеальных, так и резистивных мод (внутренних и внешних винтовых мод, тиринг-мод) во время эволюции профиля тока убегающих электронов (УЭ) при срывах в ИТЭР.

Широкий и высокий по амплитуде профиль УЭ приводит к умеренному значению  $li$ , которое обеспечивает большой ток на границе, сопровождаемый развитием как внешних винтовых, так и тиринг мод, что может привести к быстрым потерям УЭ. Высокая начальная заправка тока УЭ с умеренной пикированностью приводит к наличию долго-живущей внутренней тиринг-моды. Случаи с наибольшей плотностью тока на границе, когда  $q_a$  приближается к целому значению, демонстрируют только внешнюю винтовую неустойчивость. Плазма с очень высокой начальной заправкой тока УЭ, из-за медленного VDE и умеренного изменения профилей тока, остается в основном стабильной до тех пор, пока, на последних стадиях VDE, форма и профили плазмы существенно не искажаются. Также, отмечается, что в случаях с практически любым из первоначально выбранных профилей заправки

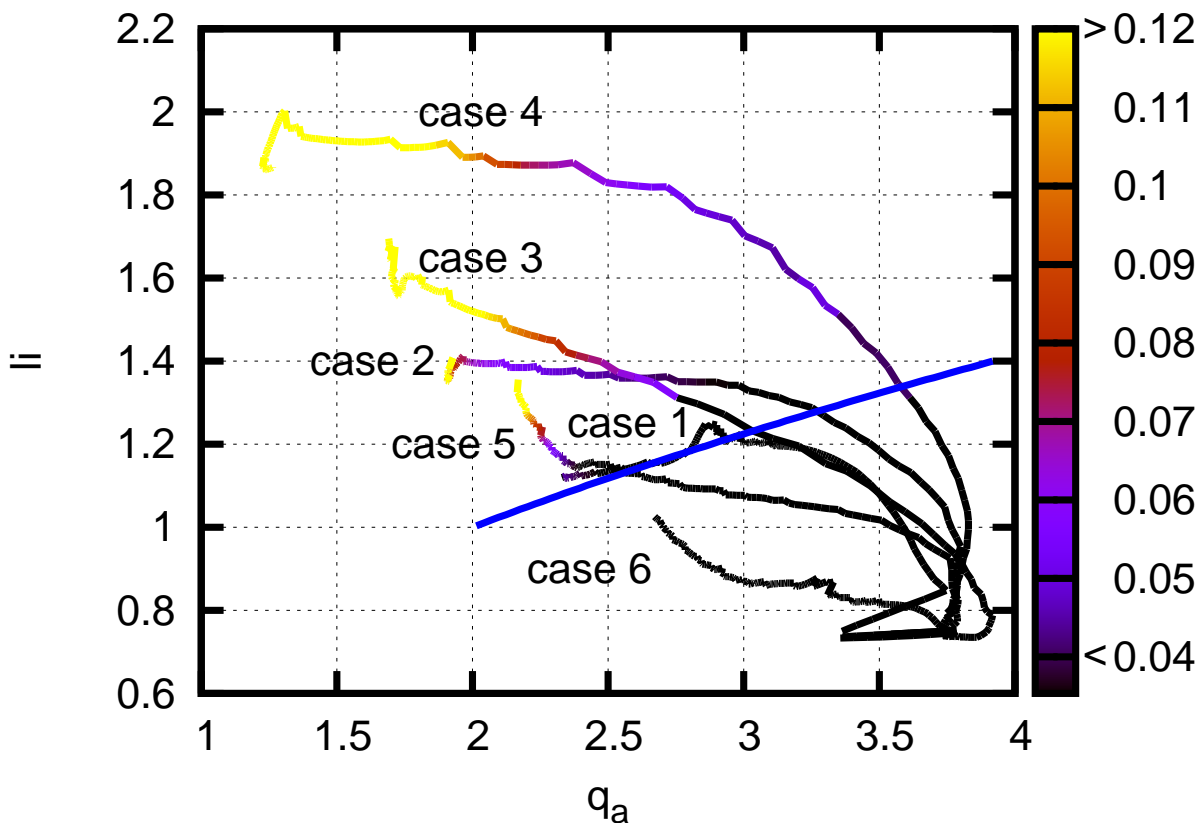


Рис. 7: Эволюция  $q_a - li$  для Случаев 1–6 (инкремент роста для внутренней винтовой моды представлен цветом ( $1/\tau_{alf}$ )) и эмпирическая граница устойчивости (синяя линия), найденная в JET [37].

тока УЭ, наблюдается развитие внутренней  $m = n = 1$  моды. Пример эволюции структуры этой моды показан на Рис. 6. На последних этапах наблюдается рост внешних винтовых мод. Таким образом, мы можем предсказать наиболее нежелательный сценарий VDE в ИТЭР, когда очень высокий ток УЭ сохраняется в плазме до конца VDE, заканчивающегося выносом энергичного пучка УЭ на стенку.

Рисунок 7 демонстрирует эволюцию VDE в пространстве  $q_a - li$  для всех 6 случаев. Черный цвет на кривых обозначает равновесия с пренебрежимо малыми инкрементами роста неустойчивости, тогда как цвет остальных кривых отражает инкремент роста неустойчивости. Синяя линия взята из Рис. 2 работы [37]. Она обозначает эмпирическую границу устойчивости, найденную в JET. Стоит отметить, что наши результаты согласуются с данной эмпирической границей устойчивости.

# Выводы

1. Теория кинетической баллонной неустойчивости была проанализирована и были получены оценки для малых параметров  $\beta \sim b \sim \omega_d/\omega \sim \varepsilon$ , что позволило значительно упростить общее уравнение КВМ.
2. Теоретический анализ кинетической баллонной неустойчивости и его сопоставление с численными результатами привели к выделению двух режимов КВМ: с «высоким температурным градиентом» и «умеренным температурным градиентом». Также было показано, что частота моды  $\omega_r$  играет важную роль в идентификации этих режимов.
  - Обнаружено, что при больших градиентах давления, общее уравнение КВМ отлично аппроксимируется диамагнитной модификацией идеального МГД уравнения.
  - Для умеренных градиентов давления предлагается новое уравнение КВМ, учитывающее конечность малого параметра  $\beta$ .
3. Впервые было выполнено численное исследование КВМ неустойчивости в стеллараторе Wendelstein 7-X. Линейное гирокинетическое моделирование микронеустойчивостей было выполнено с помощью кода GENE в плазме с конечными  $\beta$  для разных конфигураций геометрии стелларатора Wendelstein 7-X.
4. Было показано, что частоты КВМ, полученные численно для режима с большими градиентами температур в геометрии Wendelstein 7-X, хорошо согласуются с частотами КВМ, аналитически предсказанными идеальным МГД уравнением с диамагнитной поправкой.
5. Пороговые значения  $\beta$  для дестабилизации кинетических баллонных мод в конфигурациях Wendelstein 7-X с различными свойствами идеальной МГД устойчивости были получены и проанализированы. Чис-

ленное моделирование неустойчивости КВМ в стандартной (МГД-оптимизированной) геометрии Wendelstein 7-X с плоским профилем плотности и градиентом температуры  $a/L_{Ti,e} = 2$  показывает, что порог устойчивости КВМ ( $k_y \rho_s = 0,05$ ) по величине  $\beta$

- составляет около  $\beta \approx 2,2\%$  (для трубки магнитного потока, с центром в наружном крае средней плоскости, так называемой, «треугольной» плоскости) и
- $\beta \approx 1,9\%$  (для "бобовидной") по сравнению с
- $\beta \approx 0,65\%$  в не оптимизированной конфигурации, которая имеет значительно более низкий порог МГД устойчивости.

6. Критические значения  $\beta$  для КВМ, соответствующие точке пограничной устойчивости, сравнивались с референсными МГД-оценками, полученными с помощью идеального баллонного кода, и оказались ниже МГД предела в случае конфигурации КЖМ. Таким образом, мы заключаем, что мы можем ожидать появления КВМ неустойчивости раньше, чем появится соответствующая идеальная МГД неустойчивость.

## Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. A. Zocco, K. Aleynikova, P. Xanthopoulos, Strongly driven surface-global kinetic ballooning modes in general toroidal geometry. // Journal of Plasma Physics — 84(03), 745840303 — 2018.
2. K. Aleynikova, A. Zocco, P. Xanthopoulos, P. Helander, Quantitative study of kinetic ballooning mode theory in magnetically confined toroidal plasmas. // 45th EPS Conf. Plasma Phys., Prague, Czech Republic — 2018— P5.1087.
3. K. Aleynikova and Alessandro Zocco , Quantitative study of kinetic ballooning mode theory in simple geometry. // Physics of Plasmas— Vol. 24 — 2017. — P. 092106
4. K. Aleynikova, G. Huijsmans, P. Aleynikov, Linear MHD stability analysis of post-disruption plasmas in ITER. // Special Issue of Plasma Physics Reports in memory of Anatolii Borisovich Mikhailovskii. — Vol. 42 No. 5 — 2016. — pp. 486–494.
5. K. Aleynikova, G. Huijsmans, P. Aleynikov, Linear ideal and resistive MHD stability analysis of post-disruption plasmas with runaway electrons in ITER. // 42th EPS Conf. Plasma Phys., Lisbon, Portugal. — 2015.— P4.129.
6. M. Lehnen, K. Aleynikova, P. Aleynikov et al., Disruptions in ITER and strategies for their control and mitigation. // Journal of Nuclear materials. — Vol. 463. — 2015.— Pp. 39–48.
7. M. Hoelzl, G. Huijsmans, P. Merkel, C. Atanasiu, K. Lackner, E. Nardon, K. Aleynikova, F. Liu, E. Strumberger, R. McAdams, Non-linear simulations of MHD instabilities in Tokamaks including Eddy current effects and perspectives for the extension to Halo currents. // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. — Vol. 561. — 2014. — P. 012011.

## Список литературы

- [1] Connor, JW. Shear, periodicity, and plasma ballooning modes / JW Connor, RJ Hastie, JB Taylor // *Physical Review Letters*. — 1978. — Vol. 40, no. 6. — P. 396.
- [2] Antonsen, Thomas M. / Thomas M. Antonsen, Barton Lane // *Phys. Fluids*. — 1980. — Vol. 23, no. 6. — Pp. 1205–1214.
- [3] Tang, WM. Kinetic-ballooning-mode theory in general geometry / WM Tang, JW Connor, RJ Hastie // *Nuclear Fusion*. — 1980. — Vol. 20, no. 11. — P. 1439.
- [4] Waltz, R. E. / R. E. Waltz, R. L. Miller // *Phys. Plasmas*. — 1999. — Vol. 6, no. 11. — P. 4265.
- [5] Attaining neoclassical transport in ignited tokamaks / M Kotschenreuther, W Dorland, QP Liu et al. // *Nuclear fusion*. — 2000. — Vol. 40, no. 3Y.— P. 677.
- [6] Belli, EA. Fully electromagnetic gyrokinetic eigenmode analysis of high-beta shaped plasmas / EA Belli, J Candy // *Physics of Plasmas*. — 2010. — Vol. 17, no. 11. — P. 112314.
- [7] Cheng, CZ. Kinetic theory of collisionless ballooning modes / CZ Cheng // *The Physics of Fluids*. — 1982. — Vol. 25, no. 6. — Pp. 1020–1026.
- [8] Hastie, RJ. Kinetic modifications to the MHD ballooning mode / RJ Hastie, KW Hesketh // *Nuclear Fusion*. — 1981. — Vol. 21, no. 6. — P. 651.
- [9] Погуце ОП, Юрченко ЭИ. Дестабилизирующее влияние шира и предельное давление плазмы в токамаке / Юрченко ЭИ Погуце ОП // *Письма в ЖЭТФ*. — 1978. — Vol. 28, no. 6. — P. 344.
- [10] Coppi, B. Self-healing of confined plasmas with finite pressure / B Coppi, A Ferreira, Jesus J Ramos // *Physical Review Letters*. — 1980. — Vol. 44, no. 15. — P. 990.
- [11] Михайловский АБ, Юрченко ЭИ. Аналитическая теория идеальной индуцируемой широм баллонной моды токамака / Юрченко ЭИ Михайловский АБ // *Препринт ИАЭ-3505/6*. — 1981.

- [12] *Hirose, Akira*. Higher order collisionless ballooning mode in tokamaks / Akira Hirose, L Zhang, M Elia // *Physical review letters*. — 1994. — Vol. 72, no. 25. — P. 3993.
- [13] *Hirose, Akira*. Ion temperature gradient-driven ballooning mode in tokamaks / Akira Hirose, L Zhang, M Elia // *Physics of Plasmas*. — 1995. — Vol. 2, no. 3. — Pp. 859–875.
- [14] *Tsai, Shih-Tung*. Theory of kinetic ballooning modes excited by energetic particles in tokamaks / Shih-Tung Tsai, Liu Chen // *Physics of Fluids B: Plasma Physics*. — 1993. — Vol. 5, no. 9. — Pp. 3284–3290.
- [15] *Chen, Liu*. Theory of Alfvén waves and energetic particle physics in burning plasmas / Liu Chen, F Zonca // *Nuclear Fusion*. — 2007. — Vol. 47, no. 10. — P. S727.
- [16] *Bierwage, Andreas*. Pressure-gradient-induced Alfvén eigenmodes: I. Ideal MHD and finite ion Larmor radius effects / Andreas Bierwage, Liu Chen, Fulvio Zonca // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 2009. — Vol. 52, no. 1. — P. 015004.
- [17] *Bierwage, Andreas*. Pressure-gradient-induced Alfvén eigenmodes: II. Kinetic excitation with ion temperature gradient / Andreas Bierwage, Liu Chen, Fulvio Zonca // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 2009. — Vol. 52, no. 1. — P. 015005.
- [18] *Beer, M. A.* / M. A. Beer, S. C. Cowley, G. W. Hammett // *Phys. Plasmas*. — 1995. — Vol. 2, no. 7. — P. 2687.
- [19] *Pueschel, Moritz J.* Gyrokinetic turbulence simulations at high plasma beta / Moritz J Pueschel, M Kammerer, F Jenko // *Physics of Plasmas*. — 2008. — Vol. 15, no. 10. — P. 102310.
- [20] *Kotschenreuther, M.* Compressibility effects on ideal and kinetic ballooning modes and elimination of finite Larmor radius stabilization / M Kotschenreuther // *The Physics of fluids*. — 1986. — Vol. 29, no. 9. — Pp. 2898–2913.
- [21] Simulating gyrokinetic microinstabilities in stellarator geometry with GS2 / JA Baumgaertel, EA Belli, W Dorland et al. // *Physics of Plasmas*. — 2011. — Vol. 18, no. 12. — P. 122301.



- [22] *Mishchenko, Alexey*. Global particle-in-cell simulations of Alfvénic modes / Alexey Mishchenko, Roman Hatzky, Axel Könies // *Physics of Plasmas*. — 2008. — Vol. 15, no. 11. — P. 112106.
- [23] Linear gyrokinetic particle-in-cell simulations of Alfvén instabilities in tokamaks / A Biancalani, A Bottino, S Briguglio et al. // *Physics of Plasmas*. — 2016. — Vol. 23, no. 1. — P. 012108.
- [24] Electron temperature gradient driven turbulence / Frank Jenko, W Dorland, M Kotschenreuther, BN Rogers // *Physics of Plasmas*. — 2000. — Vol. 7, no. 5. — Pp. 1904–1910.
- [25] *Dannert, Tilman*. Gyrokinetic simulation of collisionless trapped-electron mode turbulence / Tilman Dannert, Frank Jenko // *Physics of Plasmas*. — 2005. — Vol. 12, no. 7. — P. 072309.
- [26] *Kotschenreuther, Mike*. Comparison of initial value and eigenvalue codes for kinetic toroidal plasma instabilities / Mike Kotschenreuther, G Rewoldt, WM Tang // *Computer Physics Communications*. — 1995. — Vol. 88, no. 2-3. — Pp. 128–140.
- [27] Electron temperature gradient turbulence / W Dorland, F Jenko, M Kotschenreuther, BN Rogers // *Physical Review Letters*. — 2000. — Vol. 85, no. 26. — P. 5579.
- [28] *Aleynikova, Ksenia*. Quantitative study of kinetic ballooning mode theory in simple geometry / Ksenia Aleynikova, Alessandro Zocco // *Physics of Plasmas*. — 2017. — Vol. 24, no. 9. — P. 092106.
- [29] *Zocco, A*. Magnetic compressibility and ion-temperature-gradient-driven microinstabilities in magnetically confined plasmas / A Zocco, P Helander, JW Connor // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — 2015. — Vol. 57, no. 8. — P. 085003.
- [30] *K. Aleynikova A. Zocco, P. Xanthopoulos P. Helander C. Nührenberg*. Kinetic ballooning modes in tokamaks and stellarators / P. Xanthopoulos P. Helander C. Nührenberg K. Aleynikova, A. Zocco // *Journal of Plasma Physics*. — 2018. — P. <https://arxiv.org/submit/2402031>.

- [31] *K. Aleynikova, A. Zocco, P. Xanthopoulos, P. Helander*. Quantitative study of kinetic ballooning mode theory in magnetically confined toroidal plasma / P. Xanthopoulos, P. Helander, K. Aleynikova, A. Zocco // 45th EPS Conference on Plasma Physics / European Physical Society. — 2018.
- [32] *Zocco, A.* Strongly driven surface-global kinetic ballooning modes in general toroidal geometry / A Zocco, K Aleynikova, P Xanthopoulos // *Journal of Plasma Physics*. — 2018. — Vol. 84, no. 3.
- [33] *Aleynikova, K.* Linear ideal and resistive MHD stability analysis of post-disruption plasmas with runaway electrons in ITER / K Aleynikova, GTA Huijsmans, P Aleynikov // 42nd EPS Conference on Plasma Physics / European Physical Society. — 2015.
- [34] Non-linear simulations of MHD instabilities in Tokamaks including Eddy current effects and perspectives for the extension to Halo currents / M Hoelzl, GTA Huijsmans, P Merkel et al. // *Journal of Physics: Conference Series* / IOP Publishing. — Vol. 561. — 2014. — P. 012011.
- [35] Disruptions in ITER and strategies for their control and mitigation / Michael Lehnen, K Aleynikova, PB Aleynikov et al. // *Journal of Nuclear materials*. — 2015. — Vol. 463. — Pp. 39–48.
- [36] *Aleynikova, K.* Linear MHD stability analysis of post-disruption plasmas in ITER / K Aleynikova, GTA Huijsmans, P Aleynikov // *Plasma Physics Reports*. — 2016. — Vol. 42, no. 5. — Pp. 486–494.
- [37] Large amplitude quasi-stationary MHD modes in JET / JA Snipes, DJ Campbell, PS Haynes et al. // *Nuclear fusion*. — 1988. — Vol. 28, no. 6. — P. 1085.