

На правах рукописи



ЗЕНИН Виталий Николаевич

Свойства геодезических акустических мод в плазме токамака Т-10

Специальность: 01.04.08 – «Физика плазмы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

МОСКВА

2018

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

Научный руководитель: **Мельников Александр Владимирович**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель руководителя Отделения токамаков по экспериментальной физике Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Курнаев Валерий Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики плазмы Национального исследовательского ядерного университета НИЯУ «МИФИ», г. Москва;

Аскинази Леонид Георгиевич

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

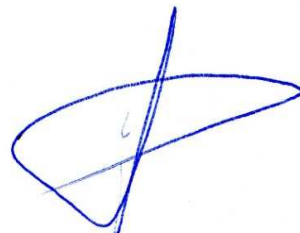
Защита диссертации состоится 12 декабря 2018 г., начало в 15.00, на заседании диссертационного совета Д 520.009.02 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат разослан « »

2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 520.009.02
кандидат физико-математических наук



А.В. Демура

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Наиболее перспективным направлением разработок управляемого термоядерного синтеза (УТС) является высокотемпературная плазма, удерживаемая магнитным полем. Эффективное удержание плазмы достигается в замкнутых магнитных ловушках, таких как токамак и стелларатор. В настоящее время разрабатываются проекты термоядерных реакторов на основе токамака и стелларатора, ведется сооружение международного реактора ИТЭР. Термоядерный реактор — основа энергетики будущего, он обеспечивает наиболее экологичный способ получения электрической энергии.

Основной проблемой, требующей решения при построении токамаков и стеллараторов, является управление процессами переноса энергии и частиц поперек удерживающего магнитного поля. Наряду с ней существует также проблема получения стационарного режима работы установки. В плазме установок с магнитным удержанием доминируют аномальные (турбулентные) процессы переноса, связанные с развитием дрейфовых неустойчивостей. Контролирование этих процессов связано с изучением стабилизации турбулентности. Одним из таких возможных (нелинейных) механизмов стабилизации является уменьшение размеров турбулентных ячеек, обусловленное широм полоидальной скорости дрейфа в скрещенных радиальном электрическом и тороидальном магнитном полях ($E \times B$ шир). В теории рассматриваются как стационарные шировые течения, так и осциллирующие, проявляющиеся в виде зональных потоков [1]. Установлено, что между зональными потоками и характеристиками турбулентности существует взаимное влияние [2].

Геодезические акустические моды (ГАМ), являющиеся высокочастотной ветвью зональных потоков, — это неотъемлемый элемент плазменной турбулентности. ГАМ рассматриваются как один из возможных механизмов её саморегулирования [3]. К настоящему моменту механизм взаимодействия ГАМ и турбулентности надёжно экспериментально не установлен, а прямой взаимосвязи

между характеристиками ГАМ и свойствами турбулентности пока в эксперименте не обнаружено.

Однако некоторые указания на существование такой взаимосвязи всё же имеются. Например, уменьшение турбулентного транспорта в краевой зоне плазмы во время вспышек ГАМ наблюдалось на установке HL-2A [4]. Влияние ГАМ на турбулентность изучалось на токамаках, FT-2 [5], T-10, где обнаружена высокая когерентность модуляций турбулентности и ГАМ [6] и трёхволновое взаимодействие между ГАМ и окружающей широкополосной турбулентностью при помощи бикогерентного анализа [7]. На токамаке ТУМАН-3М [8] наблюдалось подавление турбулентности низкочастотными осцилляциями $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ шира, а на токамаке ASDEX-U [9] была обнаружена антикорреляция между интенсивностями вспышек ГАМ и широкополосной турбулентности.

Зональные течения/ГАМ теоретически рассматриваются как возможный механизм, влияющий на переход от режима с обычным удержанием (L-мода) к режиму с улучшенным удержанием (H-мода) [10]. Экспериментально роль зональных потоков в L-H переходе рассматривалась на токамаке EAST [11], а также на токамаке DIII-D [12], где рассматривался переход к H-моду под контролем равновесного $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ шира. На токамаке ТУМАН-3М была выдвинута гипотеза о роли ГАМ как прекурсора L-H перехода и получены экспериментальные результаты в её поддержку [13].

В последнее время теоретически [14] и экспериментально [15] изучаются т.н. глобальные ГАМ. Такие колебания являются собственными модами плазменных колебаний в тороидальных установках.

Исследование свойств ГАМ проводится широким фронтом на большинстве ведущих установок мира. Исследование ГАМ является актуальной задачей, т.к. его результаты помогут прояснить то, как именно ГАМ связана с процессами аномального переноса, а также взаимосвязь ГАМ с широкополосной плазменной турбулентностью.

Степень разработанности темы исследования

ГАМ проявляет себя, главным образом, в виде колебаний электрического потенциала плазмы и полоидальной компоненты скорости вращения частиц плазмы (электрического поля E_r).

На различных замкнутых тороидальных установках исследования ГАМ проводятся с помощью разных диагностик. Колебания потенциала на частотах ГАМ изучаются с помощью зондов Ленгмюра, однако их применение ограничено только периферийной зоной плазмы.

Для исследования колебаний полоидальной компоненты скорости частиц применяется, например, пучково-эмиссионная спектроскопия (beam emission spectroscopy, BES). Однако измерения колебаний скорости этим методом сосредоточены на внешней трети радиуса плазменного шнура.

Наряду с колебаниями потенциала ГАМ проявляют себя как колебания плотности плазмы и полоидального магнитного поля. Диагностики, измеряющие эти параметры (корреляционная рефлектометрия, магнитные зонды), широко распространены на современных установках УТС. Проявления ГАМ как колебаний этих параметров всесторонне изучается, несмотря на то, что относительная амплитуда колебаний ГАМ на этих параметрах очень мала по сравнению с колебаниями электрического потенциала и полоидальной компоненты скорости колебаний частиц.

Таким образом, исследование колебаний потенциала на частотах ГАМ в горячей зоне плазмы является наименее проработанной областью. Такое исследование производят с помощью диагностики зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ, heavy ion beam probing, НВР), которая является технически сложной, поскольку требует создания и эксплуатации прецизионных высоковольтных приборов. По этой причине тяжёлый пучок существует далеко не на всех установках УТС. К настоящему моменту исследования характеристик и свойств ГАМ с помощью ЗПТИ являются актуальной задачей.

Таким образом, можно утверждать, что степень проработанности ГАМ научным сообществом высока, однако тема диссертации ранее детально не изучалась.

Цели и задачи

Целью данной работы является экспериментальное установление свойств колебаний электрического потенциала плазмы, вызванных геодезической акустической модой, как в центре, так и на периферии плазмы токамака Т-10.

В ходе работы были поставлены следующие конкретные задачи:

Провести изучение свойств ГАМ на токамаке Т-10 с использованием многоканальной диагностики зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов.

Проверить соответствие характера зависимости частоты ГАМ от температуры теоретическому скейлингу в широком диапазоне изменения температуры.

Установить зависимость амплитуды ГАМ от средней плотности плазмы.

Исследовать колебания плотности плазмы с использованием диагностики зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов, изучить корреляции между колебаниями потенциала и плотности плазмы на частотах ГАМ.

Установить полоидальное модовое число для возмущений потенциала, вызванных ГАМ.

Установить наличие корреляций между колебаниями потенциала на частотах ГАМ, измеренными ЗППТИ и зондами Ленгмюра.

Изучить влияние динамического изменения температуры и плотности плазмы, вызванных импульсным напуском примесей, на свойства ГАМ.

Научная новизна

Впервые экспериментально исследованы полоидальные корреляции колебаний потенциала на частотах геодезической акустической моды (ГАМ) в горячей зоне плазмы.

Впервые исследована зависимость частоты ГАМ от температуры в широком диапазоне изменения электронной и ионной температур (изменение T_e до 4 раз, T_i до 2 раз, охвачены практически полные операционные пределы токамака Т-10).

Впервые проведено исследование радиального распределения частоты и амплитуды колебаний потенциала, вызванных ГАМ, в широком радиальном диапазоне. Установлено существование ГАМ в условиях токамака Т-10 как собственной моды колебаний потенциала. Установлено, что частота и амплитуда ГАМ постоянны по радиусу.

Впервые исследованы дальние корреляции для ГАМ между сигналами потенциала, измеренными с помощью двух диагностик: ЗПТИ и зондов Ленгмюра.

Теоретическая и практическая значимость работы

В ходе исследований диагностика зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов была адаптирована для изучения взаимодействия ГАМ с широкополосной плазменной турбулентностью. При активном участии соискателя была проведена модернизация диагностики от одноканальной до многоканальной.

Важное значение для теории имеет экспериментальное подтверждение теоретически предсказанных свойств ГАМ: равенство нулю полоидального модового числа $m = 0$ для колебаний потенциала и корневого характера зависимости частоты ГАМ от температуры в широком диапазоне её изменения.

Установленный характер ГАМ как собственной моды колебаний потенциала, частота и амплитуда которой постоянны по радиусу, ставит задачу построения новой теории глобальной ГАМ.

Методология и методы исследования

Для исследования колебаний электрического потенциала плазмы, вызванных геодезической акустической модой, как на периферии плазмы токамака Т-10, так и в её горячей области, была использована диагностика

зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ, НВР), уникальный метод прямого измерения потенциала плазмы, который не вносит искажений в объект изучения.

В работе использованы как одноканальные, так и многоканальные измерения с помощью диагностики зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов.

Были изучены корреляции и фазовые соотношения между сигналами потенциала и плотности, зарегистрированными в одном пространственном канале ЗПТИ, в различных каналах диагностики ЗПТИ, двумя различными диагностиками (ЗПТИ и зонды Ленгмюра).

Положения, выносимые на защиту

В результате проведённых экспериментальных исследований установлены следующие характеристики ГАМ на токамаке T-10:

ГАМ обладает свойствами собственной моды колебаний потенциала. Её частота и амплитуда постоянны по радиусу.

Частота ГАМ изменяется с температурой согласно теоретическому скейлингу для температуры, взятой в радиальной точке $r/a = \rho = 0.9$.

Амплитуда ГАМ падает с ростом плотности плазмы, что согласуется со столкновительным затуханием.

Сдвиг фаз между колебаниями потенциала и плотности ГАМ составляет примерно $\pi/2$.

Полоидальное модовое число для возмущений потенциала, вызванных ГАМ, равняется нулю, что соответствует классической (локальной) теории ГАМ.

В исследованном режиме возмущения потенциала на частоте ГАМ распространяются наружу, их скорость падает от внутренних областей к наружным и составляет несколько км/с.

Импульсный напуск примеси (а именно гелия, неона и азота) приводит к временному подавлению амплитуды ГАМ вследствие роста плотности и снижению её частоты вследствие падения температур T_e и T_i .

Степень достоверности и апробация результатов

При активном участии соискателя собраны и обработаны экспериментальные данные в количестве нескольких сотен разрядов токамака Т-10. Они были самостоятельно обработаны соискателем для исследования свойств ГАМ. ГАМ обнаружена практически во всех режимах токамака Т-10, в широком диапазоне изменения параметров разряда, таких как электронная и ионная температуры T_e и T_i , плотность электронов плазмы n_e , ток плазмы I_p , тороидальное магнитное поле B_T , а также в режимах с различными методами нагрева плазмы (омическим, ЭЦР-нагревом (при помощи электронно-циклотронного резонанса) различной мощности с одним и двумя гиротронами).

Характеристики ГАМ в различных плазменных режимах Т-10 находятся в согласии между собой.

Для сигналов ЗПТИ соотношение сигнал/шум на частотах ГАМ, как правило, превышает десятичный порядок величины.

Достоверность полученных результатов также подтверждается независимыми исследованиями с помощью других диагностик: корреляционной рефлектометрии и зондов Ленгмюра. Эти диагностические построены на других физических принципах, нежели диагностика тяжёлым пучком. С помощью корреляционной рефлектометрии на токамаке Т-10 были обнаружены ГАМ на колебаниях плотности. С помощью зондов Ленгмюра ГАМ были обнаружены на периферии плазмы токамака Т-10 на колебаниях плавающего потенциала и ионного тока насыщения, они наблюдаются на тех же частотах, на которых они наблюдаются с помощью тяжёлого пучка. Анализ корреляций между данными, полученными с помощью двух диагностик: тяжёлого пучка и зондов Ленгмюра, представлен в данной работе.

Достоверность полученных результатов также подтверждается независимыми исследованиями на других установках.

Результаты работы представлялись автором на международных конференциях и на российских конференциях с международным участием:

1. **Зенин В.Н.** Исследование свойств геодезических акустических мод на токамаке Т-10 // 11-ая научная школа Курчатовского института, Москва **2013** г.
2. **Зенин В.Н.** Эволюция геодезических акустических мод в разрядах с напуском примесей в токамаке Т-10 // 58-я научная конференция МФТИ с международным участием, Москва **2015** г.
3. **Zenin V.N., Subbotin G.F., Klyuchnikov L.A.** Geodesic Acoustic Mode's Evolution in Regimes with Impurities Puffing on T-10 Tokamak // VIII International Conference Plasma Physics and Plasma Technology Minsk, Belarus **2015** г.
4. **Зенин В.Н.,** Мельников А.В., Грашин С.А., Елисеев Л.Г., Лысенко С.Е., Соломатин Р.Ю., Перфилов С.В. Исследование частотной структуры геодезических акустических мод в токамаке Т-10 // XLII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород **2015** г.
5. **Zenin V.N., Klyuchnikov L.A., Melnikov A.V., Nemets A.R., Nurgaliev M.R., Subbotin G.F.** Effect of Impurity Puffing on Geodesic Acoustic Mode in OH and ECRH regimes on T-10 // 43rd European Physical Society Conference on Plasma Physics, Leuven, Belgium **2016** г., доклад P2.024.
6. **Зенин В.Н.,** Субботин Г.Ф., Ключников Л.А. Эволюция потенциала плазмы и геодезических акустических мод в разрядах с напуском примесей в токамаке Т-10 // II Конференция «Плазменные, лазерные исследования и технологии», НИЯУ МИФИ, Москва **2016** г.
7. **Зенин В.Н.,** Грашин С.А., Драбинский М.А., Елисеев Л.Г., Лысенко С.Е., Мельников А.В., Хабанов Ф.О., Харчев Н.К. Спектральные характеристики периферийной турбулентности в токамаке Т-10 // XLV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород **2018** г.
8. **Zenin V.N., Drabinskij M.A., Eliseev L.G., Grashin S.A., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Melnikov A.V.** The study of long range electric potential correlation on the GAM frequency on the T-10 tokamak // 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Prague **2018** г, доклад P2.1090.

Публикации по теме диссертации

По теме работы опубликовано 15 научных работ в виде научных статей в отечественных и зарубежных журналах, все в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Их список приведён в конце автореферата.

Личный вклад автора

В диссертации представлены результаты семи лет работы соискателя по участию в экспериментах на токамаке T-10, использованию диагностики плазмы с помощью зондирования пучком тяжелых ионов (ЗПТИ), обработке полученных результатов и их систематизации. Использованные в диссертации данные были получены им лично или при его определяющем непосредственном участии. Соискатель принимал участие в модернизации и обслуживании диагностики, проведении эксперимента, обработке данных, подготовке докладов и написании статей.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав и Заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы, состоящего из 80 ссылок. Объём диссертации составляет 112 страниц, включая 61 рисунок.

Основное содержание работы

Во **Введении** обсуждаются актуальность темы диссертации, степень её разработанности, сформулированы цели и задачи работы, рассмотрены научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, обсуждается степень достоверности результатов, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора, указан личный вклад автора в проделанную работу. Далее рассматривается само понятие геодезической акустической моды, современные теоретические представления о ней, краткие сведения о конструкции токамака, приводится обзор экспериментальных работ по изучению ГАМ на других

установках, а также рассмотрены некоторые диагностики, присутствующие на токамаке T-10.

Первая глава посвящена описанию схемы эксперимента и основной диагностики, применявшейся для исследования ГАМ: зондированию плазмы пучком тяжелых ионов.

В § 1 приведено описание аппаратуры ЗППТИ на токамаке T-10. Описывается принцип работы диагностики, указано, почему для изучения ГАМ была выбрана именно эта диагностика, показано, почему используются именно тяжёлые ионы.

В § 2 более подробно раскрыта схема одноканальных измерений. Описан принцип работы энергетического анализатора, приводятся соотношения между измеряемыми параметрами пучка и характеристиками плазмы, обсуждается локальность измерений. Приведена схема детекторных линий, на которой показаны возможные геометрические области плазмы, в которых могут быть проведены измерения с помощью ЗППТИ.

В § 3 более подробно раскрыта схема многоканальных измерений. Приведена схема анализатора с пятью каналами сбора, которые соответствуют пяти соседним областям плазмы.

В § 4 приведены параметры исследованных режимов, отмечено, что ГАМ исследованы практически в полных операционных пределах работы токамака T-10.

Вторая глава посвящена постоянству частоты и амплитуды ГАМ от радиуса, установлению её характера как собственной моды колебаний потенциала в условиях токамака T-10, определению зависимости частоты ГАМ от температуры плазмы.

В § 1 обсуждается феноменология ГАМ. Указано, что данные диагностики ЗППТИ обрабатываются с помощью спектрального анализа с использованием быстрого Фурье-преобразования. Приведены спектры спектральной плотности мощности колебаний потенциала, указано на какой частоте наблюдаются ГАМ, отмечен контрастный характер пика ГАМ. Также приведены спектрограммы

колебаний потенциала, представляющие собой множество следующих друг за другом спектров, в результате чего можно проследить временную эволюцию ГАМ. Отмечено существование у ГАМ в некоторых случаях сателлитного пика. Также в этом параграфе обсуждается, что именно понимать под понятиями частоты и амплитуды ГАМ, а также возможность разделить ГАМ и её сателлит.

В § 2 рассматривается постоянство частоты ГАМ с малым радиусом токамака. Т.к. частота ГАМ зависит от температуры, а она меняется с радиусом, то постоянство частоты с радиусом противоречит локальной теории. Также рассмотрено постоянство амплитуды ГАМ с радиусом. Полученные результаты дают основание говорить, что ГАМ в условиях токамака Т-10 проявляют свойства глобальных собственных мод. Принципиальная возможность их существования обсуждается во Введении.

В § 3 рассматривается зависимость частоты ГАМ от температуры. Частота ГАМ изменяется при изменении электронной T_e и ионной T_i температур согласно теоретическому скейлингу классической теории. При этом частота ГАМ не изменяется при изменении температуры с радиусом (глобальный характер ГАМ). Поэтому в данном параграфе приводятся данные по частоте ГАМ, наблюдаемой в различных радиальных областях. Кроме того, можно определить радиус точки, изменение температуры в которой вызывает изменение частоты ГАМ, приравнявая $f_{\text{ГАМ эксп.}} = f_{\text{ГАМ теор.}}(\rho)$. В одножидкостном приближении $\rho \approx 0.7$, в двухжидкостном $\rho \approx 0.9$. Приведены зависимости частот ГАМ от электронной температуры либо от электронной и ионной температур, взятых при соответствующих ρ . Диапазон изменения температур составляет от 2 до 4 раз.

Зависимость частоты ГАМ от электронной температуры приведена на рис. 1. Частота ГАМ связана с изменениями T_e при $\rho = 0.73$.

Если учесть ионную температуру (двухжидкостное приближение), то частота ГАМ связана с изменениями T_e и T_i при $\rho = 0.9$, что показано на рис. 2.

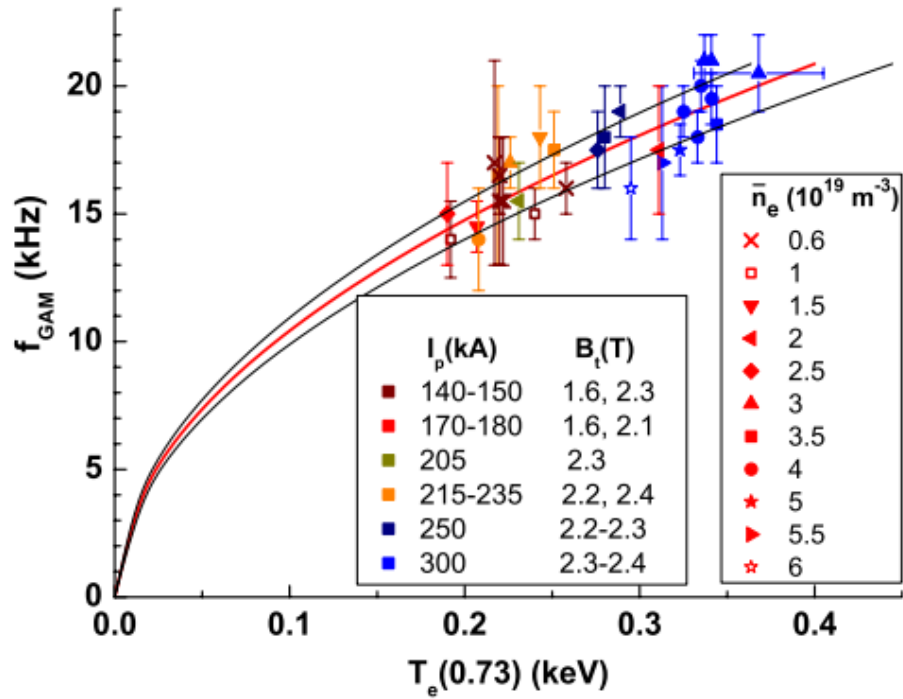


Рис. 1. Зависимость частоты ГАМ от электронной температуры.

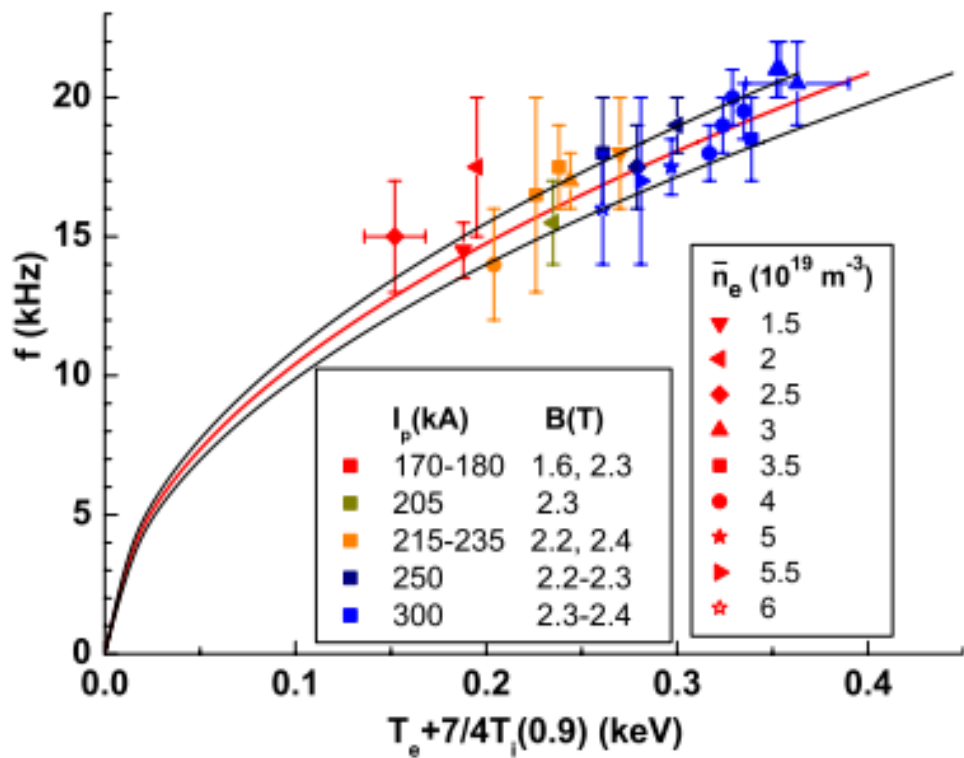


Рис. 2. Зависимость частоты ГАМ от электронной и ионной температур.

Третья глава посвящена определению параметрических зависимостей для ГАМ, определённых при помощи одноканальных измерений с помощью ЗПТИ.

В § 1 рассматривается зависимость амплитуды ГАМ от среднечордовой плотности плазмы. Установлено, что амплитуда ГАМ падает с ростом плотности, что согласуется со столкновительным затуханием.

В § 2 определяется сдвиг фаз между колебаниями потенциала и плотности на частоте ГАМ. Оба параметра плазмы изучаются при помощи ЗПТИ (определяются через первичные парциальные токи пучка ионов). Поэтому можно проводить корреляционный анализ. В случае если коэффициент корреляции был достаточно высок (> 0.4), между колебаниями потенциала и плотности плазмы определялся сдвиг фаз на частоте ГАМ и её сателлита. Установлено, что кросс-фаза потенциал-плотность для ГАМ и сателлита не зависит от радиуса и составляет величину $\pi/2 \pm 0.15\pi$, что следует также и из классической теории.

В § 3 рассмотрен перемежаемый характер ГАМ. Она представляет собой большое количество коротких цугов (~ 1 мс), частоты которых сгруппированы вокруг некой средней частоты.

В § 4 изучается динамика ГАМ в нестационарных режимах с импульсным напуском примесей. Напуск нейтральных примесей сильно влияет на ГАМ. Сразу же после напуска примеси амплитуда ГАМ резко уменьшается за масштаб времён значительно меньше диффузионных. Частота ГАМ также уменьшается примерно за диффузионное время. Время восстановления этих значений имеет тот же характерный масштаб, что и изменение основных параметров плазмы. В новой квазистационарной фазе амплитуда ГАМ становится ниже, частота ГАМ также несколько падает. При этом общие черты эффекта не зависят от типа примеси и метода нагрева.

Четвертая глава посвящена изучению тонкой структуры ГАМ с помощью многоканальных измерений при помощи пяти каналов сбора ЗПТИ.

В § 1 экспериментальным путем определяется полоидальное модовое число для колебаний потенциала на частоте ГАМ. Для этого проводится корреляционное исследование для двух различных областей наблюдения ЗПТИ, которые расположены на двух близких магнитных поверхностях. Затем определяется кросс-фаза между колебаниями потенциала в этих областях.

Используя геометрические соотношения в токамаке и измеренное значение кросс-фазы рассчитывается полоидальное модовое число m . Оказывается, что $m = 0$, что согласуется с представлениями классической теории.

В § 2 исследуются дальние корреляции электрического потенциала на частотах ГАМ с использованием ЗППТИ и зондов Ленгмюра. Так же как и в § 1 проводится корреляционное измерение, теперь уже между различными парами, которые можно составить из пяти каналов измерений, полученных с помощью тяжёлого пучка, и двух каналов измерений зонда. Определяется кросс-фаза между ними. Т.к. для ГАМ полоидальное модовое число $m = 0$ и тороидальное модовое число $n = 0$, то величина кросс-фазы определяется только радиальной разницей между положениями зонда и областью наблюдения ЗППТИ. На основании этого рассчитывается фазовая скорость распространения волны потенциала на частоте ГАМ. Оказывается, что волна потенциала на частоте ГАМ распространяется наружу, величина скорости не постоянна, она меняется от ~ 2 км/с (Δr между положениями пучка и зонда ≈ 3 см, что соответствует радиусу около 26 см) до 7 км/с (Δr между положениями пучка и зонда ≈ 11 см, что соответствует радиусу около 18 см).

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы, приведены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы, сравниваются результаты, полученные на токамаке Т-10, с результатами, полученными на других установках.

В ходе исследования соискатель принимал участие в проведении эксперимента по исследованию геодезических акустических мод (ГАМ) на токамаке Т-10 с использованием зондирования плазмы пучком тяжёлых ионов (ЗППТИ), а также в модернизации диагностики до пятиканальной. В результате экспериментов были получены следующие выводы:

Установлено, что частота и амплитуда колебаний потенциала, вызванных ГАМ, на Т-10 постоянны по радиусу. Это указывает на то, что в условиях токамака Т-10 ГАМ обладает свойствами собственной моды колебаний

потенциала, теоретическая возможность существования т.н. глобальных ГАМ была описана во Введении.

Частота ГАМ изменяется при изменении электронной T_e и ионной T_i температур (например, при дополнительном нагреве плазмы или изменении её плотности) согласно теоретическому скейлингу классической теории. Частота ГАМ, найденная в эксперименте, совпадает с теоретическим значением для температур электронов и ионов, взятых в точке $\rho \approx 0.9$.

Амплитуда ГАМ падает с ростом плотности плазмы в согласии со столкновительным механизмом затухания.

Сдвиг фаз между колебаниями потенциала и плотности ГАМ составляет примерно $\pi/2$, что согласуется с локальной теорией.

ГАМ имеет перемежаемый характер (существует в виде отдельных коротких цугов на различных частотах, которые сосредоточены вокруг средней частоты ГАМ). То же верно и для сателлита ГАМ. Вследствие этого возникает необходимость определить, что понимать под амплитудой и частотой такой моды. Такие определения были даны в параграфе 2.1.

Полоидальное модовое число для возмущений потенциала, вызванных ГАМ, равняется нулю ($m = 0$), что соответствует классической (локальной) теории ГАМ.

В исследованном режиме возмущения потенциала на частоте ГАМ распространяются наружу, их скорость падает от внутренних областей к наружным и составляет несколько км/с.

Импульсный напуск примеси (а именно гелия, неона и азота) приводит к временному подавлению амплитуды ГАМ вследствие роста плотности и снижению её частоты вследствие падения температур T_e и T_i . Этот эффект наблюдается как в фазе разряда с омическим нагревом, так и в фазе разряда с дополнительным нагревом при помощи гиротронов.

Дальнейшие исследования ГАМ с помощью ЗППТИ связаны с изучением свойств ГАМ в плазме D-образного сечения на строящемся токамаке T-15МД с омическим нагревом, ЭЦР-нагревом и нейтральной инжекцией.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Melnikov A.V. Electric potential dynamics in OH and ECRH plasmas in the T-10 tokamak / Melnikov A.V., Eliseev L.G., Perfilov S.V., Andreev V.F., Grashin S.A., Dyabilin K.S., Chudnovskiy A.N., Isaev M.Y., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Mikhailov M.I., Ryzhakov D.V., Shurygin R.V., **Zenin V.N.** // **Nuclear Fusion.** – 2013. – Т. 53. – № 9. – С.093019.
2. Melnikov A. V Electric Field Study With HIBP in OH and ECRH Plasmas on the T-10 Tokamak / Melnikov A. V, Dyabilin K.S., Eliseev L.G., Grashin S.A., Isaev M.Y., Krupnik L.I., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S.V., Ryzhakov D.V., **Zenin V.N.** // **Problems of Atomic Science and Technology, Series Plasma Physics.** – 2013. – Т. 83. – № 1. – С.30–32.
3. **Zenin V.N.** Study of poloidal structure of geodesic acoustic modes in the T-10 tokamak with heavy ion beam probing / Zenin V.N., Eliseev L.G., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Lysenko S.E., Melnikov A. V., Perfilov S. V. // **Problems of Atomic Science and Technology, Series Plasma Physics.** – 2014. – Т. 94. – № 6. – С.269-271.
4. Мельников А.В. Дальние корреляции геодезических акустических мод в установке Т-10 / Мельников А.В., Елисеев Л.Г., Лысенко С.Е., Перфилов С.В., Шелухин Д.А., Вершков В.А., **Зенин В.Н.**, Крупник Л.И., Козачек А.С., Н.К. Х., Уфимцев М.В. // **Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез.** – 2015. – Т. 38. – № 1. – С.49-56.
5. Melnikov A.V. Correlation properties of Geodesic Acoustic Modes in the T-10 tokamak / Melnikov A.V., Eliseev L.G., Lysenko S.E., Perfilov S.V., Shelukhin D.A., Vershkov V.A., **Zenin V.N.**, Krupnik L.I., Kharchev N.K. // **Journal of Physics: Conference Series.** – 2015. – Т. 591. – № 1. – С.012003.
6. Andreev V.F. Experimental study of density pump-out effect with on-axis electron cyclotron resonance heating at the T-10 tokamak / Andreev V.F., Borschegovskij A.A., Chistyakov V. V, Dnestrovskij Y.N., Gorbunov E.P., Kasyanova N. V, Lysenko S.E., Melnikov A. V, Myalton T.B., Roy I.N., Sergeev

- D.S., **Zenin V.N.** // **Plasma Physics and Controlled Fusion.** – 2016. – Т. 58. – № 5. – С.055008.
7. **Зенин В.Н.** Эволюция электрического потенциала и геодезических акустических мод в омических и ЭЦР-режимах с импульсным напуском примесей в токамаке Т-10 / Зенин В.Н., Ключников Л.А., Мельников А.В., Немец А.Р., Нургалиев М.Р., Субботин Г.Ф., Шелухин Д.А. // **Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный синтез.** – 2016. – Т. 39. – № 3. – С.91-98.
 8. **Zenin V.N.** Plasma potential and geodesic acoustic mode evolution with Helium puffing in the ECRH regime on the T-10 tokamak / Zenin V.N., Subbotin G.F., Klyuchnikov L.A., Melnikov A. V. // **Journal of Physics: Conference Series.** – 2016. – Т. 747. – № 1. – С.012005.
 9. Melnikov A.V. ECRH effect on the electric potential in toroidal plasmas (Overview of recent T-10 tokamak and TJ-II stellarator results) / Melnikov A.V., Hidalgo C., Krupnik L.I., Ascasibar E., Cappa A., Chmyga A.A., Deshko G.N., Drabinskij M.A., Eliseev L.G., Khabanov P.O., Khrebtov S.M., Kharchev N.K., Komarov A.D., Kozachek A.S., Lysenko S.E., DePablos J.L., **Zenin V.N.**, Zhezhera A.I. // **EPJ Web of Conferences.** – 2017. – Т. 149. – С.03009.
 10. Melnikov A.V. Heavy ion beam probing—diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas / Melnikov A.V., Krupnik L.I., Eliseev L.G., Barcala J.M., Bravo A., Chmyga A.A., Deshko G.N., Drabinskij M.A., Hidalgo C., Khabanov P.O., Khrebtov S.M., Kharchev N.K., Komarov A.D., Kozachek A.S., Lopez J., Lysenko S.E., Martin G., Molinero A., Pablos J.L. de, Soletto A., Ufimtsev M.V., **Zenin V.N.**, Zhezhera A.I. // **Nuclear Fusion.** – 2017. – Т. 57. – № 7. – С.072004.
 11. Melnikov A.V. Heavy ion beam probing – A tool to study geodesic acoustic modes and Alfvén eigenmodes in the T-10 tokamak and TJ-II stellarator / Melnikov A.V., Krupnik L.I., Barcala J.M., Bravo A., Chmyga A.A., Deshko G.N., Drabinskij M.A., Eliseev L.G., Hidalgo C., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Komarov A.D., Kozachek A.S., Khrebtov S.M., Lopez J., Lysenko S.E.,

- Molinero A., Pablos J.L. de, Ufimtsev M.V., **Zenin V.N.**, Zhezhera A.I. // **Problems of Atomic Science and Technology, Series Plasma Physics**. – 2017. – Т. 107. – № 1. – С.237-240.
12. Eliseev L.G. Study of GAMs and related turbulent particle flux with HIBP in the T-10 tokamak / Eliseev L.G., Lysenko S.E., Melnikov A. V., Krupnik L.I., Kozachek A.S., **Zenin V.N.** // **Problems of Atomic Science and Technology, Series Plasma Physics**. – 2017. – Т. 107. – № 1. – С.241-243.
13. Eliseev L.G. Measurement of geodesic acoustic modes and the turbulent particle flux in the T-10 tokamak plasmas / Eliseev L.G., **Zenin V.N.**, Lysenko S.E., Melnikov A. V // **Journal of Physics: Conference Series**. – 2017. – Т. 907. – № 1. – С.012002.
14. Melnikov A.V. Study of interactions between GAMs and broadband turbulence in the T-10 tokamak / Melnikov A.V., Eliseev L.G., Lysenko S.E., Ufimtsev M.V., **Zenin V.N.** // **Nuclear Fusion**. – 2017. – Т. 57. – № 11. – С.115001.
15. **Зенин В.Н.** Геодезические акустические моды в токамаках / Зенин В.Н. // **Computational nanotechnology**. – 2018. – № 1. – С.108-113.

Список цитируемой литературы

1. Diamond P.H. Zonal flows in plasma—a review / Diamond P.H., Itoh S.-I., Itoh K., Hahn T.S. // *Plasma Physics and Controlled Fusion* – 2005. – Т. 47 – № 5 – C.R35–R161.
2. Fujisawa A. A review of zonal flow experiments / Fujisawa A. // *Nuclear Fusion* – 2009. – Т. 49 – № 1 – C.013001.
3. Miki K. Role of the geodesic acoustic mode shearing feedback loop in transport bifurcations and turbulence spreading / Miki K., Diamond P.H. // *Physics of Plasmas* – 2010. – Т. 17 – № 3 – C.032309.
4. Geng K.N. The role of geodesic acoustic mode on reducing the turbulent transport in the edge plasma of tokamak / Geng K.N., Kong D.F., Liu A.D., Lan T., Yu C.X., Zhao H.L., Yan L.W., Cheng J., Zhao K.J., Dong J.Q., Duan X.R., Chen R., Zhang T., Zhang S.B., Gao X., Li J., Xie J.L., Li H., Liu W.D. // *Physics of Plasmas* – 2018. – Т. 25 – № 1 – C.012317.
5. Gurchenko A.D. Turbulence and anomalous tokamak transport control by Geodesic Acoustic Mode / Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Niskala P., Altukhov A.B., Esipov L.A., Kiviniemi T.P., Kouprienko D. V., Kantor M.Y., Lashkul S.I., Leerink S., Perevalov A.A., Korpilo T. // *Europhysics Letters* – 2015. – Т. 110 – № 5 – C.55001.
6. Melnikov A. V Investigation of geodesic acoustic mode oscillations in the T-10 tokamak / Melnikov A. V, Vershkov V.A., Eliseev L.G., Grashin S.A., Gudozhnik A. V, Krupnik L.I., Lysenko S.E., Mavrin V.A., Perfilov S. V, Shelukhin D.A., Soldatov S. V, Ufimtsev M. V, Urazbaev A.O., Oost G. van, Zimeleva L.G. // *Plasma Physics and Controlled Fusion* – 2006. – Т. 48 – № 4 – C.S87–S110.
7. Melnikov A.V. Study of interactions between GAMs and broadband turbulence in the T-10 tokamak / Melnikov A.V., Eliseev L.G., Lysenko S.E., Ufimtsev M.V., Zenin V.N. // *Nuclear Fusion* – 2017. – Т. 57 – № 11 – C.115001.
8. Bulanin V. V. GAM observation in the TUMAN-3M tokamak / Bulanin V. V., Askinazi L.G., Belokurov A.A., Kornev V.A., Lebedev V., Petrov A. V., Tukachinsky A.S., Vildjunas M.I., Wagner F., Yashin A.Y. // *Plasma Physics and Controlled Fusion* – 2016. – Т. 58 – № 4 – C.45006.

9. Conway G.D. Direct measurement of zonal flows and geodesic acoustic mode oscillations in ASDEX Upgrade using Doppler reflectometry / Conway G.D., Scott B., Schirmer J., Reich M., Kendl A. // Plasma Physics and Controlled Fusion – 2005. – T. 47 – № 8 – C.1165–1185.
10. Wagner F. A quarter-century of H-mode studies / Wagner F. // Plasma Physics and Controlled Fusion – 2007. – T. 49 – № 12B – C.B1–B33.
11. Xu G.S. First Evidence of the Role of Zonal Flows for the L - H Transition at Marginal Input Power in the EAST Tokamak / Xu G.S., Wan B.N., Wang H.Q., Guo H.Y., Zhao H.L., Liu A.D., Naulin V., Diamond P.H., Tynan G.R., Xu M., Chen R., Jiang M., Liu P., Yan N., Zhang W., Wang L., Liu S.C., Ding S.Y. // Physical Review Letters – 2011. – T. 107 – № 12 – C.125001.
12. Schmitz L. Role of zonal flow predator-prey oscillations in triggering the transition to H-mode confinement / Schmitz L., Zeng L., Rhodes T.L., Hillesheim J.C., Doyle E.J., Groebner R.J., Peebles W.A., Burrell K.H., Wang G. // Physical Review Letters – 2012. – T. 108 – № 15 – C.1–5.
13. Askinazi L.G. Evolution of geodesic acoustic mode in ohmic H-mode in TUMAN-3M tokamak / Askinazi L.G., Vildjunas M.I., Zhubr N.A., Komarov A.D., Kornev V.A., Krikunov S. V., Krupnik L.I., Lebedev S. V., Rozhdestvensky V. V., Tendler M., Tukachinsky A.S., Khrebtov S.M. // Technical Physics Letters – 2012. – T. 38 – № 3 – C.268–271.
14. Ilgisonis V.I. Global geodesic acoustic mode in a tokamak with positive magnetic shear and a monotonic temperature profile / Ilgisonis V.I., Khalzov I. V, Lakhin V.P., Smolyakov A.I., Sorokina E.A. // Plasma Physics and Controlled Fusion – 2014. – T. 56 – № 3 – C.035001.
15. Ido T. Geodesic-acoustic-mode in JFT-2M tokamak plasmas / Ido T., Miura Y., Kamiya K., Hamada Y., Hoshino K., Fujisawa A., Itoh K., Itoh S.-I., Nishizawa A., Ogawa H., Kusama Y., Group J.-2M // Plasma Physics and Controlled Fusion – 2006. – T. 48 – № 4 – C.S41–S50.