

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, академик РАН

Щербаков И.А.

«» _____ 2016

Отзыв

ведущей организации на работу Яшина Александра Юрьевича
«Исследование геодезической акустической моды
на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М», представленную в качестве
диссертации на соискание ученой степени кандидата физико–
математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Основной причиной повышенного интереса к изучению природы флуктуаций плазмы в замкнутых магнитных ловушках служит множество экспериментальных фактов, которые прямо указывают на влияние флуктуаций на макрохарактеристики плазмы. В настоящее время становится очевидным, что в тороидальных установках доминируют аномальные процессы переноса энергии и частиц плазмы, обусловленные развитием плазменных неустойчивостей, приводящие к возникновению флуктуаций разных пространственных масштабов. Представленная диссертационная работа посвящена экспериментальным исследованиям геодезической акустической моды (ГАМ) и фоновой плазменной турбулентности в тороидальных магнитных ловушках. Сравнительное изучение этих явлений было проведено в токамаках с существенно отличающейся геометрией магнитного поля ТУМАН-3М и Глобус-М. Если первая установка является классическим токамаком, созданным для решения задач управляемого термоядерного синтеза, то вторая (сферический токамак) рассматривается в качестве одного из возможных вариантов компактных источников нейтронов. Поэтому проблема описания процессов, протекающих в плазменной турбулентности и ее связи с ГАМ, выходит далеко за рамки академического интереса и имеет большое прикладное значение по созданию механизмов контроля аномальных процессов переноса в таких тороидальных системах. Актуальность данной работы не вызывает сомнения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав оригинального содержания и заключения. Объем диссертации — 118 страниц, 56 рисунков и список литературы из 101 наименований, из которых 37 с участием автора.

Представим основные положения глав и разделов диссертации и наиболее существенные полученные результаты.

Во введении сформулированы цели диссертационной работы и перечислены основные полученные результаты. Введение завершается списком статей (11) и докладов (26) автора работы.

Первая глава посвящена литературному обзору. В ней представлено достаточно полное теоретическое описание зональных потоков (ЗП) и геодезических акустических мод в токамаках. Приведен сценарий развития этих крупномасштабных возмущений по алгоритму нелинейной динамики «хищник-жертва», что свидетельствует о широком диапазоне интересов автора (выходящего за пределы плазменных представлений). Источником для появления ЗП и ГАМ в плазме являются мелкомасштабные неустойчивости дрейфового типа, которые возникают при наличии градиента плазменного давления. Такая эволюция дрейфовых флуктуаций ранее была подтверждена работами М.В. Незлина, посвященными аналоговому моделированию на мелкой воде вихревых плазменных структур. Далее в обзоре рассмотрены известные к настоящему времени методы диагностики ГАМ: электростатические и магнитные зонды, диагностика, основанная на инъекции пучка тяжелых ионов, микроволновые диагностики рассеяния. Перечислены установки, на которых используется та или иная диагностика. Отдельный параграф посвящён диагностике обратного доплеровского рассеяния и методике измерения скорости полоидального вращения плазмы в тороидальных установках. Представлен обзор результатов, полученных при исследовании ГАМ, на разных установках: ФТ-2, TEXT, ASDEX Upgrade, DIII-D, T-10 и др. На основании анализа известных к настоящему времени данных в конце главы сформулирована задача исследования: проведение комплексного сравнительного исследования ГАМ в токамаках с различной магнитной конфигурацией.

Во второй главе описываются методы диагностики ГАМ, которые используются диссертантом. Рассматриваются особенности реализации метода детектирования ГАМ на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М с использованием обратного доплеровского рассеяния. Приводятся схемы диагностик на двух токамаках: система, состоящая из двух доплеровских рефлектометров, разнесенных в полоидальном направлении на Глобус-М, и одного двухчастотного рефлектометра на ТУМАН-3М. Описываются характеристики АЦП, которые применялись для записи временных выборок сигналов, а также процедуры определения доплеровского частотного сдвига с использованием методов смещения (квадратурного гетеродинного приема и двойного гомодинного детектирования), которые позволяют перенести определение доплеровского сдвига в область низких частот. Очень важными представляются исследования автора по численному моделированию и расчету лучевых траекторий в трехмерной геометрии установки Глобус-М для определения волновых чисел рассеивающих

флуктуаций и радиусов отсечек, и выполненные для ТУМАН-3М оценки волновых чисел. В этой же главе рассмотрен комплекс диагностик для наблюдения ГАМ в токамаке Глобус-М. На рис.26 приведено полоидальное сечение плазменного шнура с указанием расположения антенн доплеровского рефлектометра и рассчитанных лучевых траекторий зондирующего излучения, линий наблюдения свечения на линии $D\alpha$, а также расположением магнитных зондов (расположение электростатических зондов приведено в тексте). Представлены численные методы обработки и анализа данных по единым алгоритмам для всех диагностик.

В третьей главе приводятся результаты исследования ГАМ на установке Глобус-М. Эти эксперименты проводились в режимах с относительно низкой плотностью электронов ($\langle n \rangle \approx (2-3) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$) с обращенной X-точкой, когда переход в H-моду был затруднен или вообще не происходил. Впервые на сферическом токамаке с малым аспектным отношением в разных режимах были получены подробные частотные и модовые характеристики ГАМ. Важным представляется наблюдение исчезновения ГАМ при переходе в улучшенный удержания плазмы (H-режим). Колебания на частоте ГАМ были идентифицированы по сигналам четырех диагностик (доплеровской рефлектометрии, магнитным и электростатическим зондам, оптическим измерениям), на рис.31 представлены соответствующие Фурье-спектры. Показано увеличение частоты ГАМ при смене рабочего газа с дейтерия на водород, что соответствует теоретическим предсказаниям (оценка по формуле для частоты в пределе больших дрейфовых орбит, которая учитывает влияние на частоту ГАМ аспектного отношения и вытянутости плазменного шнура). Определена узкая (около 2 см) пространственная область существования ГАМ вблизи сепаратрисы, что по порядку величины совпадает с теоретической оценкой. Для определения полоидальной структуры ГАМ использовался анализ кросс-фазы между колебаниями магнитного поля, измеренными магнитными зондами. Интересным представляется вычисление автобикогерентности для временных выборок доплеровского сдвига ГАМ. В работе представлен суммарный биспектр сигнала $E \times V$ скорости, показавший наличие фазовой связи между колебаниями ГАМ и высокочастотными флуктуациями скорости.

Представленные в 4 главе исследования ГАМ на токамаке ТУМАН-3М проводились в разрядах с переходом в омический H-режим, инициируемый с помощью импульсного напуска газа. На этом токамаке также были получены частотные и модовые характеристики геодезической акустической моды. Определена пространственная область локализации ГАМ. Акустические моды, развивающиеся в установке ТУМАН-3М, исчезают в течение 1 мс после перехода к режиму улучшенного удержания (L-H переход). Диагностика доплеровской рефлектометрии, которая использовалась на этой установке, позволяла оценивать изменение ширины скорости

полоидального вращения плазмы, как в низкочастотной области, так и в диапазоне частот ГАМ. В работе была обнаружена перемежаемость ГАМ с двумя характерными временами: 0.2-0.4 мс (появление/исчезновение квази-когерентных всплесков) и 5 мс (медленное изменение средних величин). Было показано, что амплитуда ГАМ контролируется медленной эволюцией уровня фоновой турбулентности, которая, в свою очередь, определяется низкочастотным изменением среднего шир скорости.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Из основных результатов диссертации отметим следующие:

1. На токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М разработаны и созданы микроволновые плазменные диагностики для регистрации ГАМ. Для этих диагностик определены оптимальные с точки зрения пространственного разрешения и разрешения по волновым числам анализируемых флуктуаций геометрии приемно-передающих СВЧ трактов.

1.1. Допплеровское обратное рассеяние с одновременным использованием двух частот зондирования в токамаке ТУМАН-3М позволило изучать шир скорости полоидального вращения плазменного шнура.

1.2. Система двух доплеровских рефлектометров, разнесенных в полоидальном направлении, на токамаке Глобус-М была включена в диагностический комплекс наряду с оптической диагностикой излучения на линии D_{α} , электростатическими и магнитными зондами.

2. Обосновано использование сигналов интенсивности излучения на линии D_{α} для регистрации колебаний плотности. Показана возможность использования такой оптической диагностики для регистрации ГАМ.

3. На сферическом токамаке Глобус-М в режиме с малой плотностью плазмы обнаружены и идентифицированы ГАМ. Полное описание их параметров в сферическом токамаке проведено впервые. Изучены Фурье-спектры и модовый состав для колебаний плотности ($n = 0$ и $m = 0$) и магнитного поля ($m = 2$), связанных с ГАМ. Определено влияние изотопного состава плазмы (водород/гелий) на наблюдаемую частоту ГАМ. Показана локализация ГАМ вблизи SOL. Эти характеристики ГАМ оказались в согласии с соответствующими теоретическими оценками.

4. Методом доплеровской рефлектометрии обнаружены ГАМ на токамаке ТУМАН-3М. Определены параметры ГАМ. Установлено, что шир скорости связан с усреднённой амплитудой турбулентности, а амплитуда ГАМ на временах порядка 5 мс синфазна с уровнем турбулентности.

5. Проведено сравнение свойств ГАМ для токамаков ТУМАН-3М и Глобус-М с разной структурой магнитного поля. В обеих тороидальных установках показано отсутствие непосредственного влияния геодезической акустической моды на переход в Н-режим. Найдены отличия в значениях

частот к олебаний и определены подобные для двух установок параметры ГАМ – области локализации и перемежаемость.

НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Научная ценность диссертации состоит в разработке новых методов микроволновой диагностики плазмы для исследования ГАМ. Впервые проведено описание пространственно-временных параметров геодезической акустической моды в сферическом токамаке. Получены сравнительные характеристики ГАМ на разных установках, что важно для развития теоретического описания явления. Получены важные результаты, по возможности использования ГАМ как показателя перехода к режиму улучшенного удержания плазмы в токамаках. Мы указали наиболее важные, с нашей точки зрения, результаты диссертации, имеющие глубокое экспериментальное обоснование, подтверждающие научно-теоретическое значение всей диссертации в целом и ее большое прикладное значение.

ДОСТОВЕРНОСТЬ

Достоверность полученных экспериментальных характеристик не вызывает сомнения. Измерения ГАМ проведены на двух установках несколькими методами с использованием диагностик, основанных на принципиально разных методах исследования плазменных характеристик (оптических, микроволновых, магнитных). Достоверность измеренных характеристик подтверждена также их сравнением с теоретическими оценками.

ВОСТРЕБОВАННОСТЬ

Установленные в работе закономерности характеристик геодезической акустической моды будут востребованы при анализе экспериментальных данных в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу в крупномасштабных тороидальных установках. По исчезновению ГАМ можно будет осуществлять дополнительный контроль перехода к режиму улучшенного удержания плазмы в токамаках. Разработанные методики обратного доплеровского рассеяния могут быть применены для исследования флуктуаций плазмы как в токамаках, так и в стеллараторах. Результаты работы могут быть использованы и уже используются во многих лабораториях Курчатовского центра, ФТИ РАН, ИЯФ РАН, ИОФ РАН, МИФИ и других научных организациях.

ЗАМЕЧАНИЯ

1. Не приведены теоретические оценки фазовых скоростей дрейфовых колебаний с известными волновыми числами (оптимальными для измерений доплеровскими рефлектометрами на двух установках).

2. При описании долгоживущих квази-когерентных вспышек не оценено отношение полуширины спектра вспышек к их центральной частоте.

3. В первой главе при анализе исследований не упомянут вклад иных процессов кроме дрейфово-диссипативных плазменных неустойчивостей в аномальный перенос плазмы в ловушках.

4. Переход к режиму улучшенного удержания плазмы в токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М описан слишком кратко (спонтанный или вынужденный, насколько контролируемый, насколько повторяющийся).

5. Не слишком удачным представляется определение «адекватный» к описанию схемы плазменной диагностики. (стр. 113).

В целом диссертационная работа представляет собой законченный труд, в котором получен ряд важных результатов как фундаментального, так и прикладного характера. Диссертационная работа Яшина Александра Юрьевича «Исследование геодезической акустической моды на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и опубликованных работ автора.

Отзыв составлен ведущим научным сотрудником, доктором физ. – мат. наук Н.Н. Скворцовой и утвержден на ученом совете отдела физики плазмы, протокол № 430 от 31 марта 2016 г.

Д.ф.м.н., в.н.с., профессор

Скворцова Н.Н.

Председатель Ученого совета
Отдела физики плазмы, к.ф.-м.н.

Иванов В.А.

Ученый секретарь,

Ларионова Н.Ф.