

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

на диссертацию Александра Юрьевича ЯШИНА

«Исследование геодезической акустической моды  
на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М»,

представляемой на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика  
плазмы.

### Актуальность темы работы

В настоящее время мировым термоядерным сообществом активно изучается взаимосвязь электрического поля, турбулентности и удержания плазмы в магнитных термоядерных установках типа токамак. Предполагается, что развитие шира (или неоднородности) вращения, вызванного дрейфом в скрещенном электрическом и магнитном полях, приводит к подавлению турбулентного переноса частиц и энергии. Появление шира может быть связано с возникновением как квазистационарных зональных потоков, так и с их высокочастотной разновидностью – геодезической акустической модой (ГАМ), которые в свою очередь являются результатом развития самой турбулентности.

Несмотря на то, что было проведено множество экспериментов, до сих пор механизмы взаимодействия ГАМ и низкочастотных зональных потоков с плазменной турбулентностью так и остались неопределенными. Поэтому изучение этих механизмов до сих пор остается наиболее актуальной задачей современных термоядерных исследований.

Диссертация А.Ю. Яшина посвящена экспериментальному исследованию ГАМ в токамаках с различной магнитной конфигурацией – Глобус-М и ТУМАН-3М. Основной акцент исследований сделан на сопоставлении свойств ГАМ для токамаков с различными геометрическими параметрами, а также на использовании комплекса диагностик для

выявления особенностей возникновения и развития ГАМ в токамаке с малым аспектным отношением. При этом основным методом исследования на обоих токамаках являлся метод доплеровского обратного рассеяния, который позволяет регистрировать флуктуации плотности плазмы и измерять скорость их вращения.

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

В первой главе описываются результаты основных работ по теоретическому и экспериментальному исследованию ГАМ и их взаимодействия с турбулентностью плазмы. Представлены основные диагностические методы, позволяющие проводить исследования ГАМ. Детально описан метод доплеровского обратного рассеяния. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны используемые в экспериментах на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М методы диагностики ГАМ, а также методы обработки сигналов этих диагностик. Приводятся схемы рефлектометров и оценка их разрешения по радиусу и волновым числам. Обосновывается использование регистрации свечения на линии  $D_{\alpha}$  для исследования колебаний плотности на частоте ГАМ. Приведены параметры электростатических и магнитных зондов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований ГАМ на сферическом токамаке Глобус-М. Обнаружено, что частота ГАМ зависит от аспектного отношения и вытянутости плазменного шнура, что предсказывается теорией. Обнаружено, что ГАМ локализована в ограниченном диапазоне радиусов (область локализации порядка 2 см). Исследована модовая структура колебаний ГАМ, проявляющаяся в различных параметрах плазмы: скорости вращения плазмы, плотности плазмы и магнитного поля. Представлены результаты исследования временной эволюции ГАМ, которая носит прерывистый вспыхивающий характер. С привлечением бикогерентного анализа продемонстрировано

наличие нелинейного трехволнового взаимодействия ГАМ с плазменной турбулентностью.

Четвёртая глава посвящена исследованиям ГАМ на токамаке ТУМАН-3М. Исследовано влияние изотопного состава плазмы на частоту ГАМ. Определены области существования ГАМ в зависимости от параметров разряда. Продемонстрировано наличие пороговой плотности плазмы, начиная с которой ГАМ перестает развиваться. Показано, что резкое уменьшение коэффициента запаса устойчивости приводит к исчезновению ГАМ. Также обнаружено, что ГАМ исчезают в режиме улучшенного удержания и при наличии развитой МГД неустойчивости. Определено, что область локализации ГАМ по малому радиусу токамака имеет размер порядка 1 см. Обнаружено, что амплитуда ГАМ изменяется с двумя характерными временами: 5 мс и 0.2 мс. При этом это изменение определенным образом связано с амплитудой турбулентности плазмы и широм скорости вращения. Наличие нелинейного трехволнового продемонстрировано с использованием автобикогерентного анализа сигналов доплеровского частотного сдвига. Проведено сравнение параметров ГАМ в токамаках с различными аспектными отношениями.

Основные результаты и защищаемые положения просуммированы в Заключение.

### **Новизна исследований и полученных результатов**

Многие результаты, представленные в диссертации, получены впервые. Так в диссертации описываются результаты исследования колебаний с частотой ГАМ излучения на линии  $D\alpha$ , которые ранее не были зарегистрированы на других установках. Впервые определена связь между низкочастотными колебаниями шира скорости, турбулентности и амплитуды ГАМ. Особенностью диссертационной работы является проведение исследований на токамаках с различной геометрией. Так комплексные исследования ГАМ, которые были проведены на токамаке с малым

аспектным отношением, позволили определить сходства и различия с результатами исследования ГАМ на классических токамаках.

### **Обоснованность основных результатов и выводов**

Все основные результаты, представленные в диссертации, сравниваются с работами других авторов, а также с данными теоретических исследований.

### **Практическая значимость работы**

Ряд полученных диссертантом результатов, безусловно, обладает новизной и представляет практическую ценность. Новая диагностика доплеровского обратного рассеяния, внедрённая на токамаке Глобус-М, позволила определить параметры ГАМ, предшествующей переходу в Н-режим. Полученные результаты могут быть использованы при построении и развитии моделей влияния изменяющихся электрических полей на плазменную турбулентность. Также результаты работы могут найти применение при развитии методов многоканальной диагностики плазменных потоков в термоядерных установках следующего поколения.

Представленная на рассмотрение работа не лишена недостатков. Ниже представлен ряд замечаний.

1. В разделе 3.3 приведено сравнение экспериментально измеренной частоты ГАМ с теоретическими предсказаниями. При этом используется формула 3.1 в пределе так называемых больших дрейфовых орбит, которая учитывает влияние на частоту ГАМ аспектного отношения и вытянутости плазменного шнура. Подобное сравнение приводится и в разделе 4.2 с использованием более простой оценки частоты ГАМ в пределе большого аспектного отношения  $R/a$  и круглых магнитных поверхностей. Однако представленные оценки не учитывают возможного влияния эффективного заряда на частоту ГАМ. Из диссертации неясно, делались ли какие-нибудь

предположения о величине эффективного заряда и степени его влияния на параметры ГАМ.

2. В разделе 4.2 также приводятся результаты определения частоты ГАМ при изменении парциального содержания дейтерия и водорода. При этом значение частоты ГАМ для водородной плазмы увеличивается по сравнению с дейтериевой плазмой, что качественно соответствует теоретическим предсказаниям. Но количественно измеренное значение частоты оказывается ниже ожидаемой. Объяснение этого расхождения с теорией в диссертации не приводится.
3. В разделе 4.4 приводятся результаты определения области локализации ГАМ по малому радиусу. Эта область оказывается порядка 1 см для случая частоты ГАМ равной 32 кГц. Однако в этом разделе диссертации не приводятся данных о локализации ГАМ на других частотах, хотя в разделе 4.2 утверждается, что измеряемый диапазон частот находится в пределах от 27 до 36 кГц. Как изменяется локализация при изменении частоты? Смещается ли она внутрь плазмы при увеличении частоты? Что наблюдается при меньших радиусах?
4. На токамаке ТУМАН-3М ГАМ исследовалась также с помощью диагностики пучка тяжелых ионов. Это исследование упоминается в обзоре (Глава 1), но сравнения результатов не приводится. Почему? Сопоставление результатов, полученных различными методами, могло бы улучшить понимание процессов, связанных с ГАМ.

Указанные замечания не затрагивают суть, актуальность и практическую значимость выполненных исследований. Работа выполнена на высоком научном уровне. Достоверность научных результатов не вызывают сомнений, личный вклад автора четко обрисован.

Результаты исследований достаточно полно отражены в публикациях в ведущих российских и зарубежных журналах, в части из которых А.Ю.

Яшин указан в качестве первого автора. Они докладывались на многих международных и российских конференциях. Автореферат диссертации правильно отражает основное содержание работы.

Диссертационная работа А.Ю. Яшина полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Автор диссертации, Александр Юрьевич Яшин, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Ведущий научный сотрудник  
НИЦ "Курчатовский институт"  
доктор физико-математических наук

Мельников А.В.

Подпись А.В. Мельникова заверяю.

Главный ученый секретарь  
НИЦ "Курчатовский институт"

Стремоухов С.Ю.