

## ОТЗЫВ

### Официального оппонента

на диссертацию Зенина Виталия Николаевича  
«Свойства геодезических акустических мод в плазме  
токамака Т-10», представленную на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.04.08 - «Физика плазмы»

Диссертационная работа Зенина Виталия Николаевича посвящена экспериментальному исследованию геодезических акустических мод (ГАМ) в токамаке Т-10. По сравнению с первыми исследованиями, проведенными в Т-10 с помощью зондирования пучком тяжелых ионов А.В.Мельниковым и др., в данной работе осуществлено детальное исследование ГАМ в том числе с помощью нового многоканального прибора для тяжелоионного зондирования. Актуальность исследования ГАМ, которое проводится разными методами и на ряде других установок обусловлено тем, что это четко выраженное явление коррелирует с плазменной турбулентностью и, соответственно, аномальными переносами в замкнутых магнитных ловушках. Поэтому детальное исследование ГАМ безусловно **актуально**.

Во **введении** помимо описания исследований ГАМ, ведущихся или проведенных на различных установках, специальный раздел посвящен степени проработанности темы исследований, из которого следует, что колебаний плазмы на частотах ГАМ в горячей (а именно для измерения потенциала плазмы в этой зоне наиболее эффективно ее зондирование пучком тяжелых ионов) зоне наименее изучены. Там же сформулированы конкретные цели и задачи работы, включающие исследование параметров ГАМ от температуры, плотности плазмы, в том числе при их изменении в течение импульса. Во введении сформулированы элементы новизны и значимости работы, приведены обоснования достоверности полученных результатов, и их апробация. В достаточно объемном (1/3 от объема диссертации) введении приводится также

краткое описание предсказаний локальной теории о частоте ГАМ и ожидаемая зависимость амплитуды ГАМ от плотности плазмы. Здесь же приведен литературный обзор исследований ГАМ на различных установках, в том числе и на Т-10.

**В первой** достаточно короткой главе описывается аппаратура для зондирования пучком ионов  $\text{Ti}^+$  на установке Т-10 и получаемые с ее помощью значения потенциала плазмы на разных радиусах установки. Если одноканальная схема измерений уже ранее использовалась до автора диссертации, то новый многоканальный анализатор с 5-ю щелям позволил провести одновременные измерения потенциала, плотности и значения полоидального поля в 5-ти соседних областях плазмы, что позволило проводить пространственные корреляционные измерения.

Во **второй** главе приводятся данные исследования зависимости частоты ГАМ от температуры. Данные о спектральной плотности мощности ГАМ во время импульса, полученные с помощью спектрального Фурье анализа, весьма информативны и позволяют следить за динамикой ее вариации при разных режимах нагрева плазмы. Реакция ГАМ, частота которой в Т-10 не зависит от малого радиуса, на локальное изменение температуры позволило автору предположить, что ГАМ приобретает свойства собственной моды колебаний в установке. Об этом же свидетельствует независимость от радиуса и амплитуды ГАМ. Наблюдается корневая частоты ГАМ от электронной температуры, однако она совпадает с предсказаниями линейной теории лишь для одного значения радиуса. Причина этого в данной главе не обсуждается.

**Третья** глава посвящена анализу зависимости амплитуды ГАМ от плотности, демонстрирующая уменьшение амплитуды с ростом плотности более выраженная для сателлитного пика. Анализ сдвига фаз между колебаниями потенциала и плотности на частоте ГАМ показывает, что этот сдвиг равен  $90^0$ , что по утверждению автора совпадает с ожиданиями локальной теории. Здесь же обсуждается интересное явление, названное

автором «перемежаемость» т.е – существование ГАМ в виде отдельных вспышек или цугов на разных частотах. К сожалению, на Т-10 сложно проследить взаимосвязь между интенсивностями ГАМ с окружающей турбулентностью, которая все же была обнаружена на Т-10 с помощью бикогернтного анализа. Динамика ГАМ при импульсном напуске примесей и нагреве объяснена автором эволюцией электронной и ионной температур.

**В четвертой главе** с помощью многоканальных измерений исследуется тонкая структура ГАМ, основным результатом проведенных измерений является утверждение, что полоидальное модовое число равно нулю, что соответствует линейной теории, а корреляционные измерения ГАМ зондированием ионным пучком и установленными на периферии зондами показывает, что такая корреляция очень большая и доходит до 0,8.

**Заключение и выводы** суммируют полученные результаты и коротко их сравнивают с данными из других установок. Главный вывод – проведенные изменения не противоречат результатам предыдущих измерений.

**К наиболее значимыми научными результатами** можно отнести тот факт, что в Т-10 ГАМ обладает свойствами собственной моды колебаний потенциала с частотой и амплитудой постоянной по радиусу, а также подтверждение линейной теории ГАМ, включая равенство нулю полоидального модового числа и корневой зависимости от температуры.

**Научная ценность работы** заключается в том, что в широком диапазоне параметров плазмы подтверждены выводы линейной теории ГАМ и о значении полоидального модового числа и зависимости частоты от корня из температуры, а также установление факта того, что ГАМ является собственной модой колебаний потенциала в токамаке.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что с диагностика зондирования плазмы ионным пучком была усовершенствована с применением многоканального анализатора ионов и адаптирована для исследования ГАМ в более широком, чем прежде диапазоне параметров плазмы, т.е расширена методическая база данного метода исследования.

**Апробация работы** достаточно хорошая как с точки зрения представления на различных конференциях, так и публикации результатов в 15 журналах, включая 3 статьи в Nuclear Fusion.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждается независимыми исследованиями, корреляцией ГАМ наблюдаемых с помощью тяжелоионной диагностики, с измерениями зондами Ленгмюра, а также качественным совпадением с результатами исследования ГАМ на других установках.

**Автореферат** полно отражает содержание диссертации.

**К диссертации можно сделать несколько замечаний:**

1. Нельзя согласиться с утверждением автора, что ранее тема «Свойства геодезических акустических мод в плазме токамака T-10» детально не изучалась. Достаточно вспомнить диссертацию руководителя диссертанта А.В.Мельникова. Очевидно, надо было сказать более аккуратно том, что в данной диссертации ГАМ исследуется в более широком диапазоне параметров плазмы и ее областей и о применении новых методик.

2. В работе не обсуждается, почему соответствие наблюдений частоты ГАМ линейной модели в виде корневой зависимости от температуры наблюдается только на одном значении радиуса (0,7 для одножидкостной модели и 0,9 для двухжидкостной). Какие из этого можно сделать выводы?

3. При общем хорошем языке и ясности изложения иногда встречаются небольшие некорректности (так исследования на токамак Alcator C-mod упоминается в настоящем времени, хотя установка закрыта) и жаргонные выражения типа «колебания ГАМ, видимые на плотности» (стр 70).

4. В тексте не объяснено, что подразумевается под трехволновым взаимодействием.

Указанные замечания не снижают общий высокий научный уровень диссертации с большим количеством экспериментальных данных,

полученных в широком диапазоне параметров токамака и корректными выводами из результатов измерений.

Диссертация В.Н. Зенина полностью удовлетворяет требованиям п. 9 действующего "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. № 1168), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор В.Н. Зенин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Заведующий кафедрой физики плазмы  
НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессор



Курнаев В.А.

26.11.2018

115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31

тел.: 8 (495) 788-56-99 доб.9657

8 (499) 324-70-24

e-mail: [vakurnaev@mephi.ru](mailto:vakurnaev@mephi.ru)

<https://mephi.ru>



Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ  
А.А. Абатурова