

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Институт  
общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук,  
член-корреспондент РАН



  
С.В. Гарнов

“26” ноября 2018 г

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**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

Процесс переноса энергии поперек магнитного поля, как явление, которое будет приводить к снижению КПД энергетического реактора управляемого термоядерного синтеза и нежелательным тепловым нагрузкам на стенки реактора, требует всестороннего изучения. Изучение данного явления в современных экспериментальных тороидальных установках с магнитной термоизоляцией высокотемпературной плазмы должно обеспечить его полное понимание и возможность управления им. В настоящее время предполагается, что значительная часть наблюдаемого в установках переноса тепла поперек магнитного поля связана с развитием турбулентности плазмы. Поэтому исследование турбулентности плазмы является актуальной задачей.

Диссертационная работа Виталия Николаевича Зенина посвящена экспериментальному исследованию важного аспекта физики плазмы тороидальных магнитных ловушек — геодезических акустических мод,

которые согласно теоретическим представлениям могут являться механизмом саморегулирования турбулентности плазмы.

**Целью диссертационной работы является** экспериментальное исследование геодезических акустических мод и их свойств в плазме токамака T-10 с помощью измерения электрического потенциала плазмы как в центральных, так и периферийных областях плазменного шнура.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, перечня условных обозначений и сокращений, а также списка цитируемой литературы, содержащего 80 наименований. Объем работы – 112 страниц, 61 рисунок. Структура и содержание работы отражает поэтапное решение задач, позволяющее достичь поставленной в диссертации цели.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы исследований, раскрыта степень разработанности темы исследования, сформулированы цели работы, перечислены задачи, решенные в диссертации, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов работы, представлены методы и методология исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, указана степень достоверности и апробация результатов.

Из **введения** также становятся понятны физические основы геодезических акустических мод в плазме тороидальных магнитных ловушек. Автор приводит ссылки на основные теоретические работы по данному явлению, из которых можно сформировать следующие выводы: существует две концепции геодезических акустических мод — локальная (мода возбуждается широкополосной турбулентностью в конкретной локальной области) и глобальная (собственная мода плазменных колебаний в установках); частота геодезических акустических мод имеет корневую зависимость от температуры; амплитуда геодезических акустических мод обратно пропорциональна экспоненте от электронной плотности вследствие столкновительного затухания; геодезические акустические моды проявляют себя как симметричные колебания электростатического потенциала с полоидальным модовым числом  $m = 0$  и тороидальным модовым числом  $n = 0$ .

Завершается **введение** подробным обзором экспериментальных исследований свойств геодезических акустических мод на российских (ФТ-2, ТУМАН-3М) и зарубежных (JFT-2M, JRPPT-2U, CHS, LHD, ASDEX-Upgrade, DIII-D, TCV, Alcator C-mod, HT-7, HL-2A, COMPASS) тороидальных магнитных ловушках, использованных в работах диагностики и полученных результатах.

В **первой главе** диссертации автор в полной мере приводит описание физических основ, устройства и принципа работы диагностики «зондирование плазмы пучком тяжелых ионов». Именно с помощью этой диагностики получены основные результаты работы. Диагностика позволяет исследовать электростатический потенциал, полоидальное магнитное поле плазмы, а также флуктуации этих параметров на большей части радиуса плазменного шнура (в том числе в «горячих» центральных областях). Усовершенствование диагностики и переход к многоканальной системе измерения, в чем автор непосредственно участвовал, позволило провести пространственные корреляционные измерения. Также в **первой главе** нашел отражение тот факт, что исследование геодезических акустических мод с помощью зондирования плазмы пучком тяжелых ионов на токамаке T-10 было выполнено практически в полном диапазоне операционных параметров установки по плотности, току плазмы и тороидальному магнитному полю. Это означает, что автором был проведен анализ значительного количества экспериментальных данных установки. Стоит отметить, что автор принимал непосредственное участие в экспериментах, в ходе которых эти данные были получены.

**Вторая глава** диссертации начинается с представления использованных в работе математических методов обработки получаемых в экспериментах данных. Обработка данных позволяла получать спектральную плотность мощности флуктуаций, кросс-спектр, когерентность и кросс-фазу, используя быстрое преобразование Фурье. Представлен характерный вид получаемых сигналов с диагностики «зондирование плазмы пучком тяжелых ионов», введены основные понятия касательно регистрируемых сигналов и их свойств.

Экспериментальные исследования, приведенные во **второй главе**, посвящены установлению зависимости частоты и амплитуды геодезических акустических мод от радиуса плазменного шнура. Эксперименты проводились при двух различных сценариях эволюции средней плотности плазмы. Установлено постоянство частоты и примерное постоянство амплитуды по радиусу. Это позволило утверждать, что геодезические акустические моды на токамаке Т-10 имеют характер глобальной собственной моды колебаний потенциала. Также была изучена зависимость частоты геодезических акустических мод от электронной температуры. Оказалось, что экспериментально полученная зависимость, как и теоретическая, имеет корневой характер зависимости от температуры. Однако количественно теоретическое и экспериментальное значение частоты совпадают только, если использовать для расчетного значения температуру электронов на фиксированном радиусе  $r/a = 0,9$  (если вести расчет по двухжидкостной МГД модели).

В **третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования зависимости амплитуды геодезических акустических мод от значения средней плотности плазмы. Измерения проводились при фиксированном радиальном положении точки наблюдения и широком диапазоне плотностей  $0,7 - 2,5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Зарегистрировано уменьшение амплитуды с ростом значения плотности, что позволило автору сделать предположение о роли столкновительного затухания в этом процессе. В целом наблюдаемая зависимость может быть описана с помощью экспоненциальной функции, что согласуется с предсказаниями теории.

Не менее важным исследованием, приведенным в **третьей главе**, является изучение сдвига фаз между колебаниями потенциала и плотности, причем флуктуации обоих этих параметров были получены с помощью зондирования плазмы пучком тяжелых ионов. В работе показано, что по результатам экспериментов значение разности фаз оказалось очень близко к ожидаемой

теоретической величине  $\pi/2$  при различных радиальных положениях точки наблюдения.

Также в **третьей главе** затронуто общее свойство геодезических акустических мод, наблюдаемых во всех экспериментах на токамаке T-10 — «перемежаемость». Перемежаемость означает существование на временных масштабах 1 – 5 мс моды в виде отдельных всплесков или цугов на различных близких частотах, причем одновременно может существовать несколько цугов. А последним представленным экспериментальным фактом является реакция геодезических акустических мод на импульсный напуск примесей (гелий, азот, неон) в плазму. После напуска примесей наблюдалось резкое уменьшение амплитуды мод и частоты, а восстановление значений происходило на больших временных интервалах, сравнимых с временами изменения макропараметров плазмы.

**Четвертая глава** завершает экспериментальные исследования, представленные в диссертационной работе. В ней убедительно показано, что геодезические акустические моды для колебаний электростатического потенциала имеют симметричную структуру: полоидальное модовое число  $m = 0$  и тороидальное модовое число  $n = 0$ . Первый результат получен путем использования для измерений потенциала усовершенствованной многоканальной диагностики зондирования плазмы пучком тяжелых ионов. Данное усовершенствование позволило иметь одновременно несколько точек наблюдения, которые были расположены на одной магнитной поверхности в одном полоидальном сечении, но при разных полоидальных углах, и провести анализ когерентности между ними. Второй же результат получен путем анализа когерентности между измерениями ленгмюровских зондов и измерениями диагностики зондирования пучком тяжелых ионов, которая оказалась довольно высокой (0,8). При этом зонды, также измеряющие потенциал плазмы, установлены в периферийных областях плазменного шнура и значительно удалены в тороидальном направлении от диагностики зондирования пучком тяжелых ионов. Помимо этого, анализ когерентности между этими двумя диагностиками показал направленность распространения колебаний

потенциала на частоте геодезических акустических мод наружу плазменного шнура со скоростями порядка единиц км/с.

В **заключении** диссертации представлены выводы по результатам проведенного исследования, а также проведено сравнение наиболее важных научных результатов работы с результатами экспериментов на других тороидальных магнитных ловушках и ожиданиями теории.

**Наиболее значимыми научными результатами** диссертационной работы В. Н. Зенина, представляющими практический и научный интерес, являются следующие:

- усовершенствована диагностика зондирования плазмы пучком тяжелым ионов с одноканальной до пятиканальной, что позволило проводить исследования в пяти точках наблюдения одновременно и получать пространственные корреляции измеряемых величин;
- установлено постоянство частоты и амплитуды флуктуаций электростатического потенциала плазмы, вызванных геодезическими акустическими модами, по радиусу плазменного шнура, тем самым подтвержден глобальный характер этих мод в токамаке Т-10;
- получена зависимость частоты геодезических акустических мод от температуры, которая носит корневой характер, что согласуется с теоретическими моделями;
- найден скейлинг для простого расчета частоты геодезических акустических мод в плазме токамака Т-10, использующий электронную и ионную температуру на радиусе  $r/a = 0,9$ ;
- получена зависимость амплитуды геодезических акустических мод от плотности плазмы, которая является обратной экспоненциальной, что согласуется с предположением о столкновительном механизме затухания данных мод;
- установлен сдвиг фаз между колебаниями потенциала и плотности ГАМ, который составляет примерно  $\pi/2$ , что подтверждает теорию;

- доказано, что для геодезических акустических мод, выраженных в виде колебаний электростатического потенциала в плазме токамака Т-10, полоидальное  $m$  и тороидальное  $n$  модовые числа равны нулю.

**Научная ценность работы** обусловлена тем, что:

- детально изучены в многочисленных экспериментах свойства геодезических акустических мод, а результаты расширяют современные теоретические представления об этом физическом явлении;
- измерения колебаний электростатического потенциала плазмы проводились с помощью уникальной диагностики зондирования плазмы пучком тяжелых ионов, позволяющий получать абсолютные значения амплитуды колебаний;
- впервые были выполнены измерения полоидальной корреляции колебаний потенциала на частота геодезических акустических мод в центральных областях плазменного шнура;
- все измерения проводились в широких диапазонах параметров (температура, плотность) и при различных радиальных положениях точек наблюдения;
- впервые исследованы дальние корреляции колебаний потенциала, измеренных двумя различными диагностиками: ленгмюровскими зондами и зондированием плазмы пучком тяжелых ионов.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что была усовершенствована диагностика зондирования плазмы пучком тяжелых ионов до пятисканальной схемы, позволяющей проводить пространственные корреляционные измерения флуктуаций потенциала. Отработаны методики цифровой обработки сигналов, с помощью которых был проведен спектральный и корреляционный анализ большого объема экспериментальных данных. Был получен скейлинг, позволяющий легко рассчитывать значение частоты геодезических акустических мод на токамаке Т-10. Установленный характер геодезической акустической моды как собственной моды колебаний потенциала, частота и амплитуда которой постоянны по радиусу, позволяет скорректировать теоретические модели явления.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждаются тем, что:

- результаты диссертации получены благодаря анализу большого количества экспериментальных данных, что гарантирует их статистическую достоверность;
- были использованы хорошо известные и не вызывающие сомнения методики спектрального и корреляционного анализа;
- для исследования флуктуаций электростатического потенциала плазмы и плотности использовалась диагностика зондирования плазмы пучком тяжелых ионов, которой коллектив токамака Т-10 владеет в совершенстве;
- результаты исследований представлены в 15 научных статьях, которые опубликованы в рецензируемых зарубежных и отечественных журналах из перечня ВАК, а также были доложены на многочисленных международных конференциях и российских конференциях с международным участием.

**Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования** в организациях, ведущих исследования по физике магнитного удержания высокотемпературной плазмы: НИЦ "Курчатовский институт", ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПбПУ, ТРИНИТИ, ИОФ РАН, ИПФ РАН, НИЯУ МИФИ, ИЯФ СО РАН.

**Недостатками работы являются:**

- 1) Отсутствие сведений о характеристиках использованных в работе аналого-цифровых преобразователей (частота дискретизации) и усилителей (полоса пропускания), а также о размерах окон анализа (количество отсчетов), которые использовались при спектральном и корреляционном анализе.
- 2) Недостаточное раскрытие вопроса экспериментального исследования взаимодействия геодезических акустических мод с широкополосной турбулентностью на токамаке Т-10.

Указанные замечания не снижают положительной оценки диссертации Зенина Виталия Николаевича. Работы В.Н. Зенина, представленные в диссертации, внесли вклад в физику магнитного удержания



высокотемпературной плазмы. Представленная диссертационная работа является целостным научным трудом, вклад автора в который является определяющим. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Достоверность полученных В. Н. Зениным результатов подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых иностранных и отечественных научных журналах, а также представленными докладами на международных и российских конференциях. Эти работы известны специалистам в данной области физики плазмы и цитируются в научных изданиях.

В целом в представленной диссертантом работе решена принципиальная задача экспериментального исследования свойств колебаний электростатического потенциала, вызванных геодезической акустической модой, как в центральных областях плазменного шнура, так и на периферии. Проведенное исследование можно смело называть детальным и масштабным, так как измерения были выполнены в широких диапазонах параметров (температура, плотность) и при различных радиальных положениях точек наблюдения, а количество проанализированных разрядов токамака Т-10 измеряется сотнями. Получены достоверные данные о зависимостях характеристик геодезических акустических от макропараметров плазмы: частоты и амплитуды мод от радиуса плазменного шнура, частоты от температуры плазмы, амплитуды от плотности плазмы. Были определены модовые числа для геодезических акустических мод. Проведено сравнение полученных научных результатов с ожиданиями теории и результатами исследований других установок с магнитной термоизоляцией высокотемпературной плазмы.

В лице В. Н. Зенина мы несомненно имеем высокопрофессионального специалиста, знания и умения которого безусловно отвечают высоким требованиям, предъявляемым к учёным, удостоиваемым степени кандидата физико-математических наук.

Оригинальные результаты диссертации, безусловно, являются достижением в области экспериментальных исследований турбулентности и

связанных с ней явлений в высокотемпературной плазме тороидальных магнитных ловушек.

Диссертация В.Н. Зенина полностью удовлетворяет требованиям, изложенным в пунктах 9 – 11, 13 и 14 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 Зенин Виталий Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв составлен старшим научным сотрудником ИОФ РАН, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 «Физика плазмы» Борзосековым В. Д., тел.: (8)-499-135-80-39, email: borzosekov@fpl.gpi.ru на основе обсуждения содержания диссертации на семинаре ИОФ РАН, который состоялся 21 ноября 2018 г.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 451 от 21 ноября 2018 г.

Старший научный сотрудник  
отдела физики плазмы ИОФ РАН, к.ф.-м.н.



Борзосеков В.Д.

Подпись старшего научного сотрудника к.ф.-м.н. Борзосекова В.Д. заверяю

Ученый секретарь ИОФ РАН, д.ф.-м.н.



С.Н. Андреев

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38  
тел.: +7 499 503 8327

e-mail: nauka@gpi.ru

<http://www.gpi.ru/>