

ОТЗЫВ


Официального оппонента на диссертацию Зенина Виталия
Николаевича

СВОЙСТВА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ МОД В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10

по специальности 01.04.08 — физика плазмы,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Диссертация Зелина Виталия Николаевича посвящена экспериментальному исследованию специфического вида низкочастотных колебаний электрического поля – геодезических акустических мод (ГАМ) на токамаке Т-10 с помощью зондирования плазмы пучком тяжелых ионов (НВР-диагностики).

Актуальность темы диссертации обусловлена двумя факторами. Во-первых, с точки зрения фундаментальной науки, ГАМ представляет собой интереснейший объект исследования, поскольку она, в отличие от подавляющего большинства колебаний и неустойчивостей в плазме, порождается не непосредственно градиентами макроскопических параметров (давления, плотности тока и пр.), а нелинейным взаимодействием высокочастотных составляющих спектра плазменной турбулентности. Возникновение ГАМ в тороидальных системах связано с наличием геодезической кривизны силовых линий магнитного поля. Амплитуда колебаний электрического поля в ГАМ очень велика, она может превышать 100% от равновесного значения. При этом ГАМ непосредственно не участвует в формировании дополнительного канала переноса вещества и энергии в плазме. Однако, ГАМ способна регулировать уровень турбулентности в плазме, а значит и влиять на аномальный перенос,



вызванной турбулентностью. С этим связан второй, практический аспект, определяющий интерес к исследованиям свойств ГАМ в токамаке. Следует иметь в виду, что ГАМ, турбулентность и электрическое поле связаны сложными нелинейными взаимодействиями, образуя систему типа «хищник - жертва», или даже «два хищника - жертва», что делает эти объекты весьма сложными для исследования, как теоретического, так и экспериментального. С экспериментальной точки зрения, трудности, не в последнюю очередь, связаны с тем, что ГАМ может иметь весьма сложную пространственно-временную структуру, что требует применения диагностики радиального электрического поля в горячей зоне плазмы с очень хорошим временным и пространственным разрешением. В результате, несмотря на то, что впервые ГАМ была обнаружена в тороидальной установке более 50 лет тому назад, это явление все еще до конца не изучено, и требует дальнейшего экспериментального исследования. НВР-диагностика, примененная в данной диссертационной работе для исследования ГАМ, позволяет исследовать временную эволюцию потенциала плазмы, в различных пространственных точках в области плазмы, труднодоступной для других диагностик радиального электрического поля, благодаря чему можно получить уникальную информацию о свойствах и локализации ГАМ. Таким образом, тема работы является, несомненно, актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении приведен обзор литературных данных по теме диссертации, посвященный, в основном, описанию известных экспериментальных фактов и теоретических моделей ГАМ, а также особенностям токамака Т-10. **В первой главе** описывается НВР-диагностика, созданная на этом токамаке. Данная диагностика является, возможно, единственным методом прямого измерения потенциала внутри горячей плотной плазмы, не требующим применения каких-либо моделей. С другой стороны, техническая реализация этой методики требует измерения высоких напряжений и малых токов с высокой точностью в условиях сильных помех со стороны плазмы и систем

токамака, что существенно усложняет реализацию метода и получение достоверной надежной информации. **Вторая глава** посвящена исследованию зависимости частоты ГАМ от локализации точки измерения потенциала, и от параметров плазменного разряда. В частности, обнаружено постоянство по малому радиусу амплитуды и частоты колебаний потенциала на частоте ГАМ, что трактуется автором как проявление глобального характера геодезической акустической моды. В то же время, обнаружено, что частота ГАМ хорошо соответствует зависимости от температуры (точнее, комбинации электронной и ионной температур) на периферии шнура $r/a \sim 0/9$, предсказываемой локальной теорией. **В третьей главе** представлены результаты исследования зависимостей свойств ГАМ от параметров плазмы. Подробно исследована зависимость амплитуды ГАМ от плотности плазмы, показано, что с ростом плотности амплитуда ГАМ уменьшается, что соответствует представлениям о столкновительном характере затухания. При исследовании корреляции между колебаниями потенциала и плотности, ассоциированными с ГАМ, обнаружено, что сдвиг фаз между этими колебаниями не зависит от малого радиуса и близок к $\pi/2$, что соответствует теоретическим представлениям о свойствах ГАМ. Представляет несомненный интерес исследование влияния напуска Ne на параметры ГАМ. В данном эксперименте напуск примеси использовался как метод динамического воздействия на профили параметров плазмы – плотности и температуры. В результате проведенных экспериментов, как утверждается, обнаружено хорошее соответствие частоты ГАМ предсказаниям теоретической формулы, связывающей частоту ГАМ с локальной температурой плазмы. **В четвертой главе** рассмотрена пространственно-временная структура ГАМ, в частности, показано, что полоидальное модовое число колебаний потенциала $m \approx 0$. Значительный интерес представляет обнаружение дальних корреляций между колебаниями потенциала плазмы на частоте ГАМ, измеренных с помощью различных диагностик (НВР и электростатических зондов) в различных сечениях токамака. Обнаруженная

сильная корреляция этих сигналов свидетельствует о глобальном, в смысле тороидальной локализации, характере ГАМ. Кроме того, интересно также наблюдение зависимости фазовой задержки от радиального расстояния между точками измерения двух диагностик, что, в принципе, позволяет определить фазовую скорость радиального распространения ГАМ. В заключении сформулированы основные результаты работы.

Достоверность и обоснованность результатов определяется использованием адекватных диагностических средств, в первую очередь – НІВР-диагностики, позволяющей проводить прямые измерения эволюции потенциала в горячей плотной плазме, а также сравнением результатов экспериментальных наблюдений с современными физическими представлениями о природе и свойствах ГАМ.

Практическая значимость полученных результатов определяется ролью, которую играет ГАМ в регуляции аномального переноса, и необходимостью контролирования уровня его в токамаке-реакторе.

Апробация результатов диссертационной работы. Основные результаты опубликованы в 15 статьях в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, в том числе таких, как Plasma Physics and Controlled Fusion и Nuclear Fusion, а также докладывались автором на 8 международных конференциях.

Автореферат полно отражает содержание диссертации

К диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Возможна альтернативная трактовка проведенных измерений, а именно:

- наблюдаемое постоянство амплитуды и частоты колебаний потенциала в широком диапазоне положений точки измерения в плазме,

- соответствие частоты этих колебаний температуре в периферийной области плазмы,

- наблюдаемая зависимость разности фаз на частоте ГАМ между измерениями НВР-диагностики и периферийным лэнгмюровским зондом, могут, в принципе, объясняться не глобальной модой, но осцилляциями радиального электрического поля, локализованными на периферии плазмы.

2. При оценке влияния напуска He на частоту ГАМ не учтено возможное изменение эффективного заряда плазмы в области локализации ГАМ. Зависимость частоты ГАМ от содержания примесей известна из литературы (D.F. Kong et al 2013 Nucl. Fusion 53 123006). Кроме того, не указано, в какой пространственной точке бралась электронная температура плазмы для сравнения экспериментально измеренной и предсказываемой теорией эволюции частоты ГАМ.

3. Определение фазовой скорости радиального распространения ГАМ по сдвигу фаз между колебаниями плавающего потенциала лэнгмюровского зонда и потенциала плазмы, измеренного НВР диагностикой, представляется не совсем безупречным, особенно для больших радиальных промежутков между этими точками. Неверно приписывать определенную таким образом скорость именно точке расположения измерительного объема НВР диагностики. Скорее, она является некоторой усредненной по указанному пространственному промежутку величиной. Кроме того, использование формулы (17) для расчета фазовой скорости может быть чревато большими ошибками как в величине скорости (из-за того, что сдвиг фазы определен с точностью до 2π), так и в знаке (из-за принципиальной неразличимости сдвигов фазы на ϕ и на $-2\pi+\phi$)

Данные замечания не умаляют высокого уровня работы и полученных в ее рамках научных результатов.

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 28 августа 2017 г. № 1024), 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».

Старший научный сотрудник

Лаборатории физики высокотемпературной плазмы,

д.ф.-м.н.

Аскинази Леонид Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

post@mail.ioffe.ru , (812) 297-2245

