

## О Т З Ы В

официального оппонента доктора физико-математических наук, доцента, заведующего сектором СВЧ методов нагрева плазмы Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) Шалашова Александра Геннадиевича ([ags@appl.sci-nnov.ru](mailto:ags@appl.sci-nnov.ru), тел.: 7 (910) 3945032, адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ГСП - 120, ул. Ульянова, 46) на диссертацию Алексея Юрьевича Попова «Теория распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной турбулентной плазме», представленную в диссертационный совет Д 002.205.03 на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01-04-08 – физика плазмы

Диссертационная работа А. Ю. Попова посвящена развитию теории высокочастотных волновых процессов в плавно неоднородной высокотемпературной плазме, удерживаемой в лабораторных магнитных ловушках. Для точного понимания особенностей современного эксперимента требуется учитывать большое количество сложных и взаимосвязанных эффектов, таких как линейное и нелинейное взаимодействие волн в неоднородной магнитоактивной плазме, возбуждение плазменной турбулентности и ее влияние на распространение электромагнитных волн, пространственную дисперсию горячей плазмы, дифракцию волновых пучков. В диссертации развит теоретический аппарат для описания этих явлений, при этом решён целый круг глубоких физических задач. Рассмотренные в работе вопросы важны, прежде всего, для развития методов СВЧ диагностики и СВЧ нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза. Кроме того, затронутые фундаментальные проблемы возникают и в смежных областях физики плазмы, например, при объяснении наблюдений естественных источников электромагнитного излучения в ионосферной и космической плазме. С этими обстоятельствами связана актуальность темы диссертационного исследования.

Центральной задачей, решаемой в диссертационной работе, является развитие теоретических методов для описания линейных и нелинейных волновых процессов, выходящих за рамки геометрооптического приближения в неоднородной магнитоактивной плазме, применение этих методов для интерпретации накопленных экспериментальных данных, а также исследования новых возможностей использования волн электронно-циклотронного диапазона частот для диагностики и нагрева высокотемпературной плазмы в тороидальных магнитных ловушках.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

В первой главе диссертации излагается последовательная теория рефлектометрической диагностики, основанной на рассеянии микроволнового излучения на флуктуациях плотности высокотемпературной плазмы. Это самая объемная часть диссертации. В ней разработан единый методический подход для описания распространения пучков электромагнитных волн в неоднородной турбулентной плазме в условиях сильной рефракции. Этот подход применяется для анализа основных актуальных экспериментальных методик: доплеровской рефлектометрии, полоидальной и радиальной корреляционной рефлектометрии, комбинированной радиальной доплеровской корреляционной рефлектометрии и схемы «усиленного рассеяния», основанной на возможности запираания электромагнитного излучения в исследуемом объеме плазмы. В результате этого анализа была выявлена ключевая роль перехода рефлектометрической диагностики из линейного по амплитуде турбулентности режима рассеяния зондирующей волны в нелинейный режим многократного малоуглового рассеяния и режим сильного рассеяния назад. Это позволило интерпретировать целый ряд наблюдаемых в эксперименте особенностей, не находивших своего объяснения до работ диссертанта, выявить ограничения рефлектометрической диагностики профиля плотности плазмы, а также предложить новые методы восстановления радиальных профилей турбулентности и скорости полоидального вращения плазмы по данным флуктуационной рефлектометрии.

Во второй главе диссертации развита теория линейной трансформации электромагнитных волн в окрестности поверхности отсечки в трехмерно-неоднородной тороидальной плазме. Данные исследования были мотивированы задачей СВЧ нагрева плотной закритической плазмы в современных и планируемых токамаках с малым аспектным отношением (сферических токамаков). Наиболее актуальная схема ввода СВЧ мощности в закритическую плазму основана на линейной трансформации обыкновенной электромагнитной моды в необыкновенную в окрестности поверхности отсечки, и последующей конверсии необыкновенной волны в квазистатическую электронную бернштейновскую волну. Эффективность этого процесса определяется его первой стадией, анализу которой и посвящена вторая глава диссертации. В этой главе получено полное аналитическое решение системы укороченных уравнений Максвелла, описывающее распределение волновых полей в области линейного взаимодействия в трехмерно-неоднородной плазме. Проанализированы основные эффекты, связанные с неоднородным характером среды, а именно с неконгруэнтностью поверхностей отсечек обыкновенной и необыкновенной волн, с широм внешнего магнитного поля и с кривизной магнитных силовых линий. Показано, что часть из этих эффектов необходимо учитывать при интерпретации и планировании современного эксперимента на токамаках. Полученные аналитически результаты решения модельной задачи проверены путем сопоставления с результатами численного моделирования. Проведен качественный анализ влияния низкочастотной дрейфовой турбулентности на эффективность линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности поверхности отсечки.

Тема нагрева плотной плазмы продолжена в третьей главе диссертации, в которой развита линейная теория распространения пучков электронных бернштейновских волн в тороидальной плазме. Здесь получено новое дисперсионное уравнение, описывающее распространение бернштейновских волн с учетом сильной пространственной дисперсии и слабых релятивистских эффектов и развита теория «плазменного волновода», в которой распространение электронных бернштейновских волн описывается за пределами стандартного геометрооптического приближения. В результате выявлены важные особенности распространения и затухания бернштейновских волн в экваториальной плоскости токамаков с малым аспектным отношением, а также предсказан новый физический эффект, связанный с возможностью сильного отражения бернштейновских волн от электронного циклотронного резонанса при наличии немонотонного профиля модуля магнитного поля.

Наиболее яркой, на мой взгляд, является четвертая глава диссертации, в которой развита теория низкопороговых параметрических неустойчивостей волн электронного циклотронного диапазона. Изложенная концепция позволила по-новому взглянуть на роль нелинейных процессов при электронном циклотронном нагреве плазмы в токамаках и стеллараторах. Считается, что ЭЦР нагрев плазмы и генерация тока являются одними из наиболее надежных и предсказуемых способов управления плазмой в тороидальных магнитных ловушках. В значительной мере это связано с простой физикой – поглощение СВЧ волн происходит в линейном режиме, при этом до области поглощения коротковолновое излучение распространяется в виде геометрооптических лучей. Ясность физических принципов и успехи в развитии мощных источников СВЧ излучения (гиротронов) привели к тому, что ЭЦР нагрев рассматривается в качестве одного из главных методов в большинстве крупных проектов токамака-реактора. Однако в современном эксперименте накопилось достаточное число фактов, свидетельствующих о нарушении описанной линейной картины поглощения СВЧ волн резонансными электронами. На современном уровне вкладываемой СВЧ мощности указанные «аномальности» не критичны, они проявляются в виде дополнительного слабого канала нагрева ионов и в особо чувствительных СВЧ диагностиках. Но при переходе на уровень мощности термоядерного реактора (50 – 200 МВт) аномальные эффекты могут существенно повлиять на энергобаланс в установке. Для проектирования таких установок необходимо либо установить новые надежные критерии «линейности» поглощения, либо научиться учитывать новые эффекты.

В диссертации приведена достаточно удачная попытка дать систематическое объяснение широкого спектра наблюдаемых при ЭЦР нагреве плазмы аномальных эффектов. Указанные эффекты связываются с возбуждением параметрических неустойчивостей, порог которых существенно снижен в специфических условиях, характерных для тороидальной плазмы. Основное

условие заключается в наличии немонотонной зависимости плотности плазмы от малого радиуса (метки магнитной поверхности), приводящее к возможности «запирания» в одной или двух дочерних волн, участвующих в нелинейном взаимодействии. В диссертации рассмотрено несколько возможных сценариев распада мощной электромагнитной волны, греющей плазму: индуцированное рассеяние с возбуждением ионной бернштейновской волны, распад на электронную и ионную бернштейновскую волны, распад на две верхнегибридные волны (двухплазмонный распад). Разные каналы нелинейного распада отвечают за разные аномальные явления, наблюдавшиеся в эксперименте. Так, аномальный нагрев ионов связывается с распадом электромагнитной волны на электронные и ионные бернштейновские волны, который проходит наиболее эффективно в присутствии дрейфовой ячейки с повышенной плотностью плазмы (блоба). Аномальное рассеяние греющего плазму излучения наиболее убедительно объясняется двухплазмонным распадом с последующим развитием каскада плазмонов, рассеивающихся на ионных бернштейновских волнах, и слиянием дочерних плазмонов с образованием электромагнитной волны. В этом случае удастся описать стадию нелинейного насыщения верхнегибридной турбулентности и достаточно точно воспроизвести наблюдаемые спектры рассеяния.

В целом диссертационная работа представляет собой значительный вклад в развитие теории распространения волн в плавно-неоднородной плазме. В ней получен целый ряд новых практически важных результатов:

- Получено теоретическое обоснование основных методик, применяемых в флуктуационной рефлектометрии. Установлены критерии перехода диагностики из линейного по амплитуде турбулентности режима рассеяния зондирующей волны в нелинейные режимы.
- Продемонстрирована пригодность доплеровской рефлектометрии в нелинейном режиме многократного малоуглового рассеяния для определения полоидальной скорости вращения флуктуаций плотности плазмы.
- Обоснована схема усиленного рассеяния в рефлектометрической диагностике.
- Предложены корректные методы реконструкции характеристик флуктуаций плотности из данных флуктуационной рефлектометрии.
- Развита теория линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности в тороидально неоднородной плазме. Исследованы механизмы, ухудшающие эффективность линейной трансформации обыкновенных и необыкновенных волн в плазме токамака.
- Найдены новые режимы циклотронного взаимодействия сильно замедленных электронных бернштейновских волн в токамаках с малым аспектным отношением.
- Развита теория низкопороговых параметрических неустойчивостей волн электронного циклотронного диапазона, учитывающая реальные особенности распределений плотности плазмы и магнитного поля в тороидальных ловушках. В частности, впервые показана возможность низкопорогового возбуждения параметрических распадных неустойчивостей при ЭЦ нагреве плазмы необыкновенной волной на второй циклотронной гармонике, дано объяснение ряда «аномальных» явлений, наблюдавшихся в экспериментах по дополнительному нагреву плазмы в токамаках и стеллараторах.

Основные результаты диссертации получены с применением современных методов аналитической теории, подтверждены в численных расчётах и сопоставлены с данными эксперимента, что подтверждает их обоснованность. Результаты диссертации отражены в публикациях в ведущих международных и отечественных реферируемых научных журналах из списка ВАК (ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Физика плазмы, Вопросы атомной науки и техники, Physical Review Lett., Physical Review, Nuclear Fusion, Plasma Physics and Controlled Fusion, IEEE Transactions on Plasma Science, Physica Scripta, Europhysical Letters), докладывались на научных конференциях и семинарах, широко известны специалистам, что подтверждает их достоверность. В частности,

по материалам докторской диссертации А. Ю. Поповым был сделан доклад на теоретическом семинаре ИПФ РАН, получивший высокую оценку слушателей.

Все основные результаты, изложенные в диссертации, получены лично А.Ю. Поповым или в соавторстве при его непосредственном участии, в большей части работ А.Ю. Попов выступал инициатором исследований.

Следует подчеркнуть, что диссертационная работа А.Ю. Попова производит сильное впечатление, прежде всего тем, что результаты и следствия глубоких теоретических обобщений в ней доводятся до вида, допускающего непосредственное сопоставление с экспериментальными данными, используются для интерпретации существующих и могут быть использованы при планировании новых экспериментов. Эта черта диссертации определяет её высокую практическую ценность.

Тем не менее, как и всякий крупный научный труд, рецензируемая диссертационная работа не свободна от недостатков, делающих необходимыми следующие замечания.

1. Во введении после ссылки [4] сразу следует ссылка [70], далее порядок нумерации ссылок на источники полностью сбит.

2. В начале главы 2 на стр. 109 утверждается, что «Подход, который использовался автором диссертационной работы, – обобщение процедуры поиска функциональной подстановки, развитой в одномерном случае в работах [75, 76] и сводящей в трехмерном случае систему дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных к уравнению второго порядка в частных производных, допускающему разделение переменных, – кардинально отличался от подхода группы из ИПФ РАН, анализировавших модельную задачу и искавших ее частное решение». С этим утверждением нельзя согласиться, поскольку из 8 цитируемых в диссертации работ нижегородской группы лишь одна была посвящена исследованию частных решений специального вида. Во всех остальных работах анализируется полное решение задачи, получаемое методом, с математической точки зрения полностью аналогичным применяемому диссертантом. А именно, задача сводится к уравнению второго порядка с разделяющимися переменными, записанному для амплитуды волны с определенным направлением распространения в ВКБ области.

3. В разделах 2.1 и 2.3 выводится система уравнений для электромагнитных волн, линейно взаимодействующих в окрестности критической поверхности с учетом трехмерной неоднородности плазмы, шира магнитного поля и кривизны магнитной силовой линии. Следует отметить, что впервые подобного рода система была рассмотрена в работе *H. Weitzner. Phys. Plasmas. Vol. 11 (2004). P. 866*. Введенная в данной работе система координат учитывала тороидальную симметрию токамака, что привело к двумерной волновой задаче, для которой было получено общее решение в интегральной форме. Диссертант использует локальную декартову систему координат, одна из осей которой направлена вдоль магнитного поля. Для токамака это довольно нетривиальное решение, поскольку при наличии полоидального поля такое выравнивание приводит к трехмерно неоднородной задаче в локальной системе координат, т.е. к утрате тороидальной симметрии. Тем не менее, получившаяся трехмерная задача оказывается проще двумерной задачи в системе координат, выровненной вдоль тороидального направления. Примером сложностей, возникающих во втором подходе, помимо работы Вайтцнера могут служить работы самого диссертанта до 2011 года, например *A.Yu. Popov. Plasma Phys. Control. Fusion. Vol. 49 (2007). P.1599*. Используемый в диссертации подход был предложен в работе *A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov. Plasma Phys. Control. Fusion. Vol. 52 (2010). P.115001*, где было впервые приведено общее решение для электромагнитного поля и коэффициента трансформации в окрестности критической поверхности для произвольной неоднородности магнитного поля, применимое в области параметров, рассматриваемой в настоящей диссертации. В том числе это решение учитывало шир и кривизну магнитной силовой линии (см. формулу (4) в цитируемой статье, в которой  $\partial\theta/\partial\xi$  отвечает за шир,  $\partial\theta/\partial\zeta$  отвечает за кривизну). Вызывает недоумение, что указанные обстоятельства в диссертации не обсуждаются.

4. Изложенная в диссертации теория линейной трансформации волн не учитывает кривизну поверхностей постоянного давления в токамаке. При этом для обоснования применимости построенной модели в разделе 2.2 проводится сопоставление с результатами полноволновых расчётов, проведённых в строгой тороидальной геометрии, и делается вывод о неплохом количественном совпадении теории и расчета (см., в частности, график на рис. 2.5). Это утверждение нуждается в дополнительных комментариях, поскольку противоречит опубликованному в работе *E.D. Gospodchikov et al. Plasma Phys. Control. Fusion. Vol. 54 (2012). P. 045009* выводу о сильном влиянии полоидальной кривизны магнитной поверхности на эффективность линейной трансформации. Тороидальная кривизна также должна сказаться на результатах численного моделирования, поскольку сохранение тороидального волнового числа в геометрии токамака приводит к очень существенному изменению угла между поверхностями отсечки в сравнении с выражениями, приведенными в диссертации.

5. В разделе 2.4, посвященном анализу влияния низкочастотной дрейфовой турбулентности на эффективность линейной трансформации электромагнитных волн в окрестности критической поверхности, сделан вывод о наличии двух основных эффектов, приводящих к деградации эффективности – это, по терминологии автора, рассеяние вперед и назад. Вклад, отвечающий «рассеянию назад» (см. формулу (2.84)), не удовлетворяет предельному случаю  $l_c \rightarrow \infty$ , в котором флуктуации сводятся к однородной добавке к регулярному профилю плотности плазмы. В используемом автором приближении постоянного магнитного поля и линейного профиля плотности плазмы, постоянная добавка к плотности плазмы не должна изменять коэффициент взаимодействия. Способ вычисления «рассеяния вперед» также нуждается в дополнительном комментарии, поскольку этот эффект накапливается на трассах, значительно превышающих моделируемую область линейного взаимодействия, см. *E.V. Sysoeva et al., Plasma Phys. Control. Fusion. Vol. 55 (2013). P. 115001*. Было бы так же интересно увидеть сравнение полученных результатов с выводами работы *A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, Plasma Phys. Control. Fusion. Vol. 56 (2014). P. 25011*, в которой была рассмотрена аналогичная задача и, в частности, был сделан вывод о пренебрежимо малом вкладе рассеяния назад на фоне рассеяния вперед даже за пределами борновского приближения.

6. В разделе 3.2.2 влияние циклотронного поглощения на распространение электронной бернштейновской волны анализируется в рамках теории возмущений квазиоптического волнового уравнения (3.53). При этом все влияние диссипации сводится к сдвигу собственных чисел локализованных мод невозмущенного уравнения, а взаимодействие между модами не учитывается. Обоснование этого приближения отсутствует. Между тем, насколько мне удалось понять, в рассматриваемой задаче поглощение является резкой функцией поперечной координаты, поэтому в принципе может приводить к абберациям, то есть к рассеянию основной поперечной моды в соседние, в том же порядке, что и рассмотренный в диссертации эффект. Учет рассеяния в высшие моды может привести к профилям поглощения, более близким к результатам приведенного в разделе 3.2 геометрооптического расчета.

7. При описании низкопороговых параметрических неустойчивостей в главе 4 автор ограничился случаем электромагнитной волны необыкновенной поляризации на второй циклотронной гармонике. В тоже время нагрев плазмы на крупнейшем строящемся токамаке ИТЭР планируется осуществлять с использованием обыкновенной волны на первой циклотронной гармонике. В связи с этим хотелось бы видеть расширение теории на этот важный случай.

8. Работа содержит незначительные стилистические погрешности и опечатки, в частности, в формулах (1.77), (1.91), (1.102), (2.72), (2.75) и в пояснении к (1.135). Отмечу также нестандартное использование автором понятия «диэлектрическая восприимчивость», которая вводится в диссертации как размерная величина.

Сделанные замечания имеют частный характер, не затрагивают основных результатов диссертации и положений, выносимых на защиту, и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертация А. Ю. Попова представляет собой законченную научную работу, удовлетворяющую всем требованиям Положения ВАК о порядке присуждения докторских степеней. Содержание диссертации адекватно отражено в автореферате диссертации. Считаю, что Алексей Юрьевич Попов безусловно заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01-04-08 – физика плазмы.

Официальный оппонент

зав. сектором № 172 ИПФ РАН

доктор физико-математических наук, доцент

А. Г. Шалашов

Подпись А. Г. Шалашова заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН

кандидат физико-математических наук

И. В. Корюкин