

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу Попова Алексея Юрьевича "Теория распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной турбулентной плазме", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

### **Актуальность темы диссертации**

Ранее описание динамики взаимодействия высокочастотного электромагнитного излучения с неоднородной плазмой включая приложения к термоядерным установкам было основано на применении асимптотических методов для решения модельных дифференциальных уравнений второго и более высокого порядка, а также интегро-дифференциальных уравнений. Это позволило исследовать в рамках модельных задач характеристики процесса линейной трансформации волн, возможность резонансного взаимодействия различных колебаний неоднородной замагниченной плазмы на одной частоте с существенным обменом энергией между ними, а также нелинейную трансформацию волн, для которых локально выполнены распадные условия. В разработанных ранее теоретических моделях для описания процессов распространения, линейной и нелинейной трансформации микроволновых пучков в неоднородной плазме за счет упрощений задача сводилась к одномерной, что позволяло получить точное аналитическое решение. Однако, как показал анализ экспериментальных данных, эти одномерные модели не всегда могут адекватно описать характеристики плазмы в установках. В экспериментах были получены данные, которые нельзя объяснить без учета двумерной или трехмерной неоднородностей плазмы, например, в токамаках с учетом реальных профилей невозмущенных параметров (плотность плазмы, внешнее магнитное поле и др.), а также эффектов дифракции и рефракции волнового пучка, присутствия в плазме низкочастотной турбулентности. В указанной связи данная диссертация посвящена развитию современных, адекватных реальным экспериментам теоретических моделей, которые корректно описывают линейную и нелинейную трансформацию волновых пучков. Для достижения цели диссертантом сформулированы и решены конкретные задачи.

Данная задача весьма актуальна для реализации эффективного нагрева плазмы мощным высокочастотным излучением, например, до термоядерных температур, а также при использовании коллективного рассеяния пучков зондирующих СВЧ волн для диагностики плазмы и получения информации о турбулентности в ней. Это важно и для корректной интерпретации данных исследований динамики космической плазмы и т.д. Здесь необходимо отметить, что для улучшения локализации измерений параметров плазменной турбулентности в последние годы был предложен и реализован новый подход, в котором зондирование проводится на волнах СВЧ диапазона, которые имеют в плазме область с сильной рефракцией. Данный подход называется флуктуационной рефлектометрией и он является современным развитием классической рефлекто-метрической диагностики, которая позволяет провести реконструкцию профиля плазмы в конкретной установке.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Цели и задачи данной диссертационной работы состоят в следующем. Во-первых, это разработка теоретических моделей флуктуационной рефлектометрии, которые дадут возможность получить в конкретной ситуации адекватную интерпретацию результатов работы диагностики и реконструировать параметры дрейфовой турбулентности. Второе, дальнейшее развитие теории линейной трансформации нормальных мод в окрестности критической поверхности в трехмерно-неоднородной плазме с учетом поперечной

неоднородности внешнего магнитного поля и кривизны магнитных силовых линий, а также исследование возможного влияния низкочастотной дрейфовой турбулентности на эффективность линейной трансформации. В-третьих, современное развитие теории распространения и поглощения электронных бернштейновских волн в неоднородной плазме с учетом в динамике волн влияния двумерной неоднородности плазмы токамаков с малым аспектным отношением и роли слабых релятивистских эффектов. В-четвертых, разработка теории низкопороговой параметрической неустойчивости, которая позволит объяснить возникновение аномального отражения волны накачки и нагрев ионов в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы в тороидальных ловушках.

### **Новизна исследований, полученных результатов и выводов из них**

В диссертации автором изложен ряд новых, важных для данного научного направления результатов, среди которых можно выделить следующие. 1) Впервые получены критерии перехода рефлектометрической диагностики из линейного (по амплитуде турбулентности) режима рассеяния зондирующей волны в нелинейный режим многократного малоуглового рассеяния либо в режим сильного рассеяния назад. 2) Впервые развито корректное теоретическое обоснование для реализации различных видов флуктуационной рефлектометрии плазмы, возможных при линейном и нелинейном режимах рассеяния зондирующей волны. В случае линейного режима работы радиальной корреляционной доплеровской рефлектометрии получена формула для критического значения угла наклона зондирования, когда вклад слабо локализованного малоуглового рассеяния в рефлектометрический сигнал подавлен. Для нелинейного режима многократного малоуглового рассеяния показана возможность использования доплеровской рефлектометрии в целях определения скорости вращения флуктуаций плотности и получена связь длины корреляции сигналов радиальной корреляционной рефлектометрии с радиальной корреляционной длиной и амплитудой флуктуаций плотности. 3) На основе развитых теоретических моделей автором предложены корректные методы реконструкции характеристик флуктуаций плотности по данным флуктуационной рефлектометрии плазмы и обоснована схема реализации усиленного рассеяния в рефлектометрической диагностике. 4) Разработана теория линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности для реалистичной модели плазмы с многомерной неоднородностью, выводы из которой согласуются с результатами численного моделирования. 5) Получен критерий реализации существенного влияния низкочастотной дрейфовой турбулентности на эффективность линейной трансформации волн в окрестности критической поверхности. 6) Впервые получено замкнутое выражение для дисперсионного уравнения, описывающего электростатические электронные бернштейновские моды с учетом слабого релятивизма. 7) Дана теоретическая интерпретация возбуждению плазменного волновода для электронных бернштейновских волн, распространяющихся в экваториальной плоскости токамака с малым аспектным отношением. Предсказано появление дополнительных областей прозрачности и заметного отражения электронной бернштейновской моды от поверхности ЭЦ резонанса в случае немонотонного профиля модуля магнитного поля. 8) Доказана возможность низкопорогового возбуждения параметрических распадных неустойчивостей при ЭЦ нагреве плазмы необыкновенной волной на второй гармонике этого резонанса. Теория этих неустойчивостей, развитая в диссертации с учетом особенностей профиля плотности плазмы и магнитного поля в тороидальных ловушках, позволяет объяснить ряд аномальных явлений, наблюдавшихся в экспериментах по дополнительному нагреву плазмы в токамаках и стеллараторах.

**Новизна** полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений, а их достоверность подтверждается корректностью поставленных задач, методов их

исследования и решения, а также сравнением результатов расчетов с результатами имеющихся экспериментальных данных.

**Научная и практическая значимость** проведенных в диссертации исследований определяются широким спектром приложений линейной и нелинейной трансформации пучков СВЧ волн в современной физике плазмы. Развитые теоретические модели флуктуационной рефлектометрии позволили объяснить важные закономерности работы этой диагностики плазмы и они используются, например, для интерпретации экспериментов и восстановления параметров турбулентности на токамаках. Так анализ линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности с учетом трехмерной неоднородности и шира магнитного поля позволил существенно развить теоретические представления по линейной трансформации нормальных мод. Далее анализ распространения пучков ЭВ волн в двумерно-неоднородной плазме с учетом пространственной дисперсии и слабых релятивистских эффектов значительно дополняет имевшиеся теоретические представления и его результаты учитываются при интерпретации и планирования экспериментов в токамаках с малым аспектным отношением. Далее анализ низкороговой нелинейной трансформации пучков электромагнитных волн ЭЦ диапазона частот существенно дополнил имевшиеся теоретические представления, а также позволил объяснить аномальные явления при ЭЦ нагреве плазмы.

**Достоверность** полученных в диссертации результатов обусловлена использованием хорошо обоснованных математически методик расчетов, а так же их сравнением с экспериментальными данными и результатами численного моделирования. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 31 статье в рецензируемых изданиях. Они также неоднократно докладывались на ведущих совещаниях и конференциях по тематике диссертации.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация содержит Введение, четыре главы основного материала, заключение, список цитируемой литературы (152 наименования) и 116 рисунков. Общий объем работы – 264 страницы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, кратко описано содержание глав.

**Первая глава** посвящена теории распространения и трансформации пучков электромагнитных волн в неоднородной турбулентной плазме в условиях сильной рефракции, а также ее приложениям для реализации различных типов флуктуационной рефлектометрии. В разделе 1.1 изложена (линейная по амплитуде флуктуаций) теория по-лоидальной рефлектометрии, получены аналитические выражения для мощности сигнала, регистрируемого одной из приемных антенн, корреляционной функции двух сигналов от приемных антенн, разнесенных в полоидальном направлении. Развита метод реконструкции профиля флуктуаций плотности и скорости их полоидального вращения с учетом вклада малоуглового рассеяния. В разделе 1.2 на основе линейной модели рассеяния зондирующей волны дано обоснование радиальной корреляционной разновидности доплеровской рефлектометрии с измерениями при наклонном зондировании плазмы на двух близких частотах. Получено выражение для кросс-корреляционной функции двух сигналов, получен критерий на угол наклона антенны, когда вклад малоуглового рассеяния подавлен. В **разделе 1.3** развита нелинейная теория радиальной корреляционной рефлектометрии. Показано, что в случае линейного режима рассеяния локальность измерений корреляционной функции сигналов в двух частотных каналах и частотного спектра турбулентности невысока. Кросс-корреляционная функция (ККФ) убывает по логарифмическому закону с увеличением расстояния между точками отсечки зондирующего излучения. В сильно нелинейном режиме получена

формула для ККФ сигналов в двух частотных каналах в различные моменты времени. Ширина частотного спектра рефлектометрического сигнала в сильно нелинейном режиме существенно превосходит ширину спектра турбулентности, зависит от её уровня и корреляционной длины. В разделе 1.4. описана нелинейная теория доплеровской рефлектометрии. Получено выражение для сдвига частотного спектра, показано, что ширина частотного спектра существенно зависит от амплитуды турбулентности. Указано, что в некоторых режимах рефлектометрической диагностики наблюдаются скачки времени задержки и фазы зондирующей волны, что может быть связано с быстрыми изменениями плотности плазмы либо брэгговским рассеянием назад (БРН). В разделе 1.5 получен критерий перехода БРН в этот режим. В разделе 1.6 изложен анализ возможности восстановления спектров турбулентности плазмы при наклонном зондировании, дано описание метода реконструкции радиального профиля флуктуаций плотности по измерениям флуктуаций фазы рефлектометрического сигнала в зависимости от частоты зондирования. .

**В главе 2** рассмотрена теория линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности в турбулентной плазме с трехмерной неоднородностью при наличии кривизны и шира магнитного поля. В разделе 2.1. рассмотрен случай магнитного поля без шира с прямыми силовыми линиями. Показано, что учет трехмерной неоднородности модуля магнитного поля приводит к тому, что поверхности отсечки обыкновенной и необыкновенной волны, не являются (как в одномерно-неоднородном случае) плоскопараллельными, а их взаимное положение характеризуется некоторым углом  $\alpha$ . Показано, что размер области непрозрачности определяется номером собственной поперечной моды и величиной угла  $\alpha$ . Получены коэффициенты трансформации и отражения мод, отмечена их асимметрия относительно знака  $\alpha$ . В разделе 2.2 проведено сравнение результатов аналитического анализа и численного моделирования, показано их разумное согласие. В разделе 2.3 проведено исследование влияние шира и кривизны магнитного поля на эффективность линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности, что важно для корректной интерпретации экспериментальных результатов. Дан вывод системы уравнений, которая описывает линейную трансформацию мод в окрестности критической поверхности, учитывает шир магнитного поля и эффект кривизны магнитной силовой линии на магнитной поверхности. Получены интегральные выражения для амплитуд взаимодействующих полей. Анализ показывает согласие с ранее полученными приближенными решениями. В разделе 2.4 рассмотрено влияние низкочастотной дрейфовой турбулентности на эффективность линейной трансформации пучков электромагнитных волн в окрестности критической поверхности без учета шира магнитного поля и кривизны магнитных силовых линий. Исследован случай статистически однородных дрейфовых колебаний, которые имеют гауссовский спектр по волновым числам. Получены коэффициенты отражения и прохождения волн, проведен анализ их зависимости от исходных параметров задачи.

**В главе 3** рассмотрена линейная трансформация пучков электронных бернштейн-новских волн в плазме с двумерной неоднородностью с учетом пространственной дисперсии и слабoreлятивистских эффектов. В разделе 3.1 получено дисперсионное уравнение для электростатической ЭБВ при максвелловской функции распределения с учетом релятивистской поправки к циклотронной частоте электронов. Затем в разделе 3.2 развита двумерная теория распространения и затухания ЭБВ в экваториальной плоскости токамаков с малым аспектным отношением. Согласно расчетам, поведение лучевых траекторий ЭБВ в окрестности экваториальной плоскости сферического токамака зависит от формы поверхности ЭЦ резонанса. В случае вогнутой поверхности ЭЦ резонанса лучевые траектории ЭБВ демонстрируют регулярное осцилляторное поведение вокруг экваториальной плоскости. В окрестности

экваториальной плоскости формируется волно-вод, параметры которого слабо меняются вдоль большого радиуса установки, а ЭБ волны распространяются в форме собственных мод. Затухание собственных мод с малым собственным числом сильно отличается от предсказаний квазиклассического анализа (поведения лучевых траекторий). Однако моды волновода с большим собственным числом могут быть описаны в рамках квазиклассического приближения. В разделе 3.3 представлена теория распространения и затухания ЭБВ при немономтонном профиле модуля магнитного поля, который встречается в равновесных магнитных конфигурациях в токамаках с малым аспектным отношением. Показано, что в присутствии сильной неоднородности плотности плазмы и немономтонного профиля модуля магнитного поля возможно существование ЭБВ между поверхностью верхнего гибридного резонанса и гармониками ЭЦ резонанса. Получено приближенное дисперсионное уравнение для ЭБВ и показано, что в случае низких ЭЦ гармоник возможно сильное отражение волн от поверхности ЭЦ слоя.

**В главе 4** изложена теория низкопороговой нелинейной трансформации пучков СВЧ волн. Приведено рассмотрение нескольких сценариев низкопорогового распада электро-магнитной волны необыкновенной поляризации в присутствии немономтонного профиля плотности плазмы. В разделе 4.1 проанализирована низкопороговая неустойчивость необыкновенной волны накачки, приводящая к возбуждению 2D (3D) резонатора для ионной бернштейновской волны (ИБВ) и необыкновенной волны, распространяющейся в обратном направлении. При двумерной неоднородности магнитного поля возможна локализация ИБВ и в полоидальном направлении, что дает резкое снижение потерь ее энергии из области параметрического распада. В итоге получено сильное (на 4 порядка) уменьшение порога возбуждения конвективной неустойчивости. Для типичных условий экспериментов на токамаке получена оценка порога этой неустойчивости. При немономтонном профиле плотности плазмы в токамаке возможно параметрическое возбуждение резонатора и развитие абсолютной неустойчивости, для которой вычислены инкремент и порог возбуждения. В разделе 4.2 рассмотрены оптимальные экспериментальные условия для возбуждения параметрических распадных неустойчивостей при ЭЦ нагреве плазмы на второй гармонике ЭЦ резонанса в токамаках и стеллараторах, что делает возможным аномальный нагрев ионной компоненты. В разделе 4.3 исследована низкопороговая неустойчивость параметрического распада пучка ЭЦ волн необыкновенной поляризации в турбулентной плазме. Указано, что на нелинейной стадии развития дрейфовых неустойчивостей возможна генерация долгоживущих структур, филаментов, дрейфовых вихрей, вытянутых, вдоль магнитной силовой линии и локализованных в поперечном направлении. Плотность плазмы в этих структурах выше фоновой. В силу этого, они могут (в присутствии неоднородного магнитного поля) приводить к трехмерной локализации ЭБ волн. Низкочастотные колебания, возбуждаемые в результате неустойчивости, являются медленными ионнозвуковыми волнами, которые за счет сильного бесстолкновительного затухания приводят к аномальному нагреву ионов, наблюдаемому в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы. В разделе 4.4 дан анализ низкопороговой двухплазменной параметрической неустойчивости. Установлено, что при немономтонном профиле плотности плазмы происходит радиальная локализация дочерних верхнегибридных (ВГ) волн. Это приводит к полному подавлению их энергетических потерь из области параметрического распада вдоль направления неоднородности плазмы. Радиально запертые ВГ плазмоны, распространяющиеся по магнитной поверхности в противоположные стороны, дополнительно локализованы и в пучке накачки. В итоге в плазме возбуждается абсолютная неустойчивость, а порог ее возбуждения значительно ниже, чем для монотонного профиля плазмы. Как механизм насыщения этой неустойчивости рассмотрен каскад распадов дочерних ВГ волн, приводящий к возбуждению вторичных ВГ волн и низкочастотных колебаний. Нелинейное взаимодействие различных дочерних волн, возбуждаемых при абсолютной

двухплазменной неустойчивости необыкновенной волны и каскадного механизма ее насыщения, может приводить к генерации необыкновенной волны, частота которой будет ниже частоты волны накачки. Указано, что это позволяет воспроизвести в деталях спектр аномально рассеянных волн, измеряемый в эксперименте, и оценить мощность принимаемых из плазмы сигналов.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, из которых кратко можно выделить следующие.

1) Получены критерии перехода рефлектометрии из линейного режима рассеяния зондирующей волны в сильно нелинейный режим рассеяния зондирующей волны «вперед» и «назад». Впервые развито последовательное теоретическое описание различных видов флуктуационной рефлектометрии для линейного и нелинейного режимов рассеяния зондирующей волны. Это позволило объяснить основные закономерности работы данной диагностики, разработать методы реконструкции параметров и профилей флуктуаций плотности, а также их вращения.

2) Решена задача о линейной трансформации нормальных мод в окрестности критической поверхности в плазме с трехмерной неоднородностью. Получены интегральные выражения для амплитуд взаимодействующих полей, коэффициентов трансформации и отражения, критерий на амплитуду флуктуаций, когда рассеяние взаимодействующих волн переходит в нелинейный режим и наблюдается уменьшение эффективности трансформации. Это дает существенное развитие имевшихся теоретических представлений в теории линейной трансформации нормальных мод.

3) Получено дисперсионное уравнение для электронных бернштейновских волн с учетом слабых релятивистских эффектов. Показано, что для ЭБВ в экваториальной плоскости установки может возникать плазменный волновод, а в равновесной магнитной конфигурации с немонотонным радиальным профилем модуля магнитного поля для ЭБВ существует дополнительная область прозрачности между поверхностью верхнего гибридного резонанса и поверхностью гармоник электронного циклотронного резонанса. Получено дисперсионное уравнение, описывающее параметры ЭБВ в этой области.

4) Рассмотрены сценарии низкороговой параметрической неустойчивости электронных циклотронных волн необыкновенной поляризации с учетом возможных особенностей профиля плотности плазмы. Получены выражения для порога и инкремента неустойчивости волны накачки. Предложен параметрический механизм, позволяющий объяснить аномальное отражение волны накачки и нагрев ионов в экспериментах по ЭЦ нагреву плазмы в тороидальных ловушках.

#### **Замечания по работе.**

В работе имеются грамматические погрешности, например, в реферате на стр.3, 6, 21, 23. ; на некоторых рисунках надписи являются нечеткими. Указанные замечания не меняют общей положительной оценки данной диссертации.

#### **Выводы.**

Диссертация Попова А.Ю. весьма актуальна, она выполнена на высоком научном уровне. Результаты диссертации, полученные в основном впервые, докладывались на крупных российских и международных конференциях. По ним опубликовано 31 научная работа в ведущих рецензируемых изданиях мирового уровня включая работы в научных журналах из перечня ВАК РФ. Предложенные в диссертации методы решения и модели процессов распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной турбулентной плазме убедительно аргументированы и являются дальнейшим существенным развитием на мировом научном уровне в рассматриваемой области исследований и разработок. Полученные результаты могут быть использованы, например,

для корректной интерпретации экспериментальных данных по взаимодействию мощных волновых пучков с термоядерной плазмой, для дальнейшего развития методик нагрева плазмы до высоких температур мощным электромагнитным излучением, совершенствования моделей взаимодействия этого излучения с учетом многомерной неоднородности плазмы и внешнего магнитного поля, его кривизны, а также плазменной турбулентности, параметрических неустойчивостей, слабого релятивизма и нелинейных процессов.

Считаю, что диссертационная работа вполне соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени доктора наук. Автор настоящего диссертационного исследования Попов Алексей Юрьевич безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

Доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий отделом федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Российской академии наук  
"Института космических исследований" ( ИКИ РАН)

Ерохин  
Николай Сергеевич

117342, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32  
Тел. 8-(495)-333-41-00  
Моб. +7-(963)-925-14-64  
e-mail: nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Подпись Н.С. Ерохина заверяю, ученый секретарь ИКИ РАН,  
д.ф.м.н.

А.В. Захаров