

Отзыв официального оппонента Александра Владимировича Тимофеева
(главного научного сотрудника Курчатовского комплекса физико-химических технологий Научного
исследовательского центра «Курчатовский институт»,
адрес: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
тел.: +7 (499) 196 9905, e-mail: Timofeev_AV@nrcki.ru),
доктора физико-математических наук, профессора
на диссертацию Алексея Юрьевича Попова
«Теория распространения и трансформации микроволновых пучков в неоднородной
турбулентной плазме», представленную на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук
по специальности 01-04-08 – физика плазмы

Теория плазмы включает большое число задач, которые связывают ее с механикой, гидродинамикой и т.д. и требуют для своего решения различных математических подходов. Из числа таких задач диссертант выбрал весьма актуальные, привлекающие внимание как теоретиков, так и экспериментаторов. При их решении он сумел выйти на передовые рубежи современной теории плазмы.

Глава 1 диссертации посвящена разработке теории рефлектометрической диагностики плазмы, основанной на явлении отражения электромагнитной волны с частотой меньше электронной ленгмюровской. На границе области прозрачности волна замедляется, и на ее распространение особенно эффективно влияют процессы, происходящие в данной области. Это позволяет, в частности, получить информацию о скорости движения плазмы в окрестности точки отражения и характеристиках турбулентных флуктуаций плотности в данной области. Последние, как показывает эксперимент, практически неизбежны в системах магнитного удержания плазмы и играют важную роль в ее динамике. При теоретическом анализе рефлектометрической диагностики выяснилось, что более слабое малоугловое рассеяние волны на всем ее пути может существенно влиять на параметры отраженной волны. Данный фактор включен в рассмотрение, проводимое в разделе 1.1. Показано, что с помощью т. н. поляризационной рефлектометрии можно по смещению отраженного сигнала определить скорость полоидального вращения плазмы, а по его амплитуде оценить уровень турбулентных пульсаций. Найдено, что точность восстановления измеряемых характеристик зависит от их пространственного распределения, а также от радиального распределения плотности плазмы.

Рассеяние электромагнитной волны резко усиливается при ее приближении к границе области прозрачности. Поэтому информацию о таком важном параметре турбулентности как корреляционная длина флуктуаций можно извлечь из кросс-корреляционной функции двух сигналов, различающихся по частоте, и следовательно, отражающихся в разных точках. Для этого желательно подавить малоугловое рассеяние, действующее на всей трассе зондирующей волны. Анализ, проведенный в разделе 1.2, показывает, что подавление имеет место для сигналов, распространяющихся под достаточно большим углом к градиенту плотности, который в системах магнитного удержания ортогонален магнитному полю. Этот вывод подтверждается результатами независимого численного моделирования.

В разделе 1.3 рассмотрен нелинейный режим рассеяния зондирующей волны, при котором флуктуации ее фазы существенно превышают единицу. Чтобы сделать возможным корректное аналитическое описание данного режима, принят ряд упрощений. Предполагается, что длина волны мала по сравнению с характерными пространственными масштабами и что основным является малоугловое рассеяние на всей трассе волны. Сильное рассеяние вынуждает включить в

рассмотрение двумерные эффекты, к числу которых относится дифракция. Диссертанту удалось преодолеть математические трудности и в ряде случаев довести анализ до конечных результатов. Подтверждены выводы упрощенного одномерного описания, использовавшегося в предыдущих разделах. В частности, показано, что измерения кросс-корреляционной функции позволяют надежно определить уровень турбулентных пульсаций.

В разделе 1.4 анализируется доплеровская рефлектометрия в режиме нелинейного малоуглового рассеяния. В этом случае как сдвиг принимаемого сигнала по частоте, так и частотная ширина определяются всей трассой зондирующей волны. В результате ширина спектра зависит не только шириной спектра турбулентных пульсаций, но и от перепада скорости полоидального вращения плазмы.

Если в спектре турбулентности присутствуют флуктуации с длиной волны, вдвое меньшей длины волны зондирующего сигнала, то становится возможным т.н. брэгговское рассеяние назад. В результате сигнал отражается, не дойдя до границы области прозрачности. Это делает невозможным рефлектометрическое определение профиля плотности плазмы. В разделе 1.5 определена пороговая амплитуда резонансных флуктуаций плотности плазмы, при превышении которой брэгговское отражение становится существенным. Также проанализирована возможность «запираания» волны между границей области прозрачности и точкой брэгговского резонанса.

Раздел 1.6 посвящен проблеме восстановления характеристик турбулентности по результатам рефлектометрических измерений. Для однородной турбулентности указан метод определения ее спектра по зависимости кросс-корреляционной функции от разности частот зондирующих электромагнитных волн. Для реальных систем с неоднородным распределением флуктуаций разработана итерационная процедура нахождения пространственного распределения по совокупности данных, полученных при вариации частоты зондирующего сигнала. В ее основе лежит предположение об определяющем вкладе в рассеяние окрестности точки отражения.

Проблема локализации рассеяния зондирующей волны может быть решена путем создания СВЧ резонатора между поверхностью брэгговского резонанса и границей области прозрачности. Эта возможность детально анализируется в диссертации. Результаты аналитического рассмотрения подтверждаются двумерным численным моделированием.

Проблема ВЧ нагрева плазмы в системах магнитного удержания, в особенности в крутых токамаках, где магнитное поле ослаблено, делает актуальной задачу о прохождении электромагнитных волн через т.н. радиоокно, приводящем к трансформации обыкновенных волн в необыкновенные (О-Х трансформация). При этом оказывается необходимым принимать во внимание не только неоднородность плазмы, но и более слабую неоднородность магнитного поля. Учет этих факторов возможен лишь в рамках уравнения в частных производных, коэффициенты которого являются функциями координат. Диссертантом предложен оригинальный метод решения волнового уравнения, основанный на разделении переменных. Полученные им общие выражения, учитывающие неколлинеарность градиентов плотности плазмы и магнитного поля, выявили такие особенности явления прохождения электромагнитных волн через радиоокно, как асимметрию коэффициентов прохождения по отношению к знаку угла между градиентами плотности плазмы и магнитного поля, а также равенство коэффициентов прямой и обратной трансформации обыкновенных волн в необыкновенные, что согласуется с теоремой взаимности. Результаты аналитического рассмотрения подтверждаются численным моделированием, а также независимым анализом, который другим методом проводился в ИПФ РАН Нижнего Новгорода.

Учет шири силовых линий магнитного поля и их кривизны потребовал дальнейшего развития метода. Это было достигнуто с помощью интегрального преобразования Габора. В диссертации показано, что в реальных системах кривизна силовых линий может существенно ослабить прохождение волн через радиоокно, в то время как влияние шири менее значительно.

Двумерные эффекты становятся существенными, если в окрестности критической поверхности возбуждены флуктуации плотности, неоднородные в направлении, ортогональном градиенту плотности. Нелинейное взаимодействие с такими флуктуациями поворачивает волновой вектор падающей волны. В результате ухудшаются условия О-Х трансформации волны, которая при отсутствии флуктуаций распространялась бы под оптимальным углом к магнитному полю, обеспечивающим ее полную трансформацию. В диссертации рассчитан критический уровень флуктуаций, превышение которого вызывает существенное уменьшение коэффициента трансформации.

Электронные бернштейновские волны (ЭБВ) играют важную роль в процессах ВЧ нагрева плазмы, диагностики ее внутренних слоев и устойчивости. Длина волны ЭБВ сравнима с электронным ларморовским радиусом, поэтому при их анализе необходимо учитывать большое число циклотронных гармоник. На ЭБВ существенно влияют также релятивистские эффекты. По этим причинам волновое уравнение, описывающее распространение ЭБВ, и дисперсионное уравнение, следующее из него, оказываются чрезвычайно громоздкими. В разделе 3.1 дисперсионное соотношение ЭБВ приведено к довольно компактному виду. С его помощью показано, что ЭБВ должны чрезвычайно эффективно поглощаться в реальных условиях, даже если резонанс с электронами осуществляется на высоких гармониках электронной циклотронной частоты.

Малая длина волны ЭБВ оправдывает использование лучевого приближения при их описании. В лучевом приближении проанализирована траектория ЭБВ вблизи экваториальной плоскости токамака. Найдено, что если поверхность ЭЦР выгнута наружу, то траектории уходят на периферию плазменного шнура. При изменении знака кривизны этой поверхности лучевые траектории осциллируют относительно экваториальной плоскости, причем амплитуда осцилляций уменьшается по мере приближения к резонансу. Это означает, что в окрестности экваториальной плоскости образуется волновод. В разделе 3.2 получено упрощенное волновое уравнение, описывающее пространственную структуру стационарных ЭБВ. С его помощью показано, что при использовании лучевого приближения завышается поглощение наиболее крупномасштабных мод волновода.

В разделе 3.3 найдено, что в окрестности ЭЦР поверхности ЭБВ становятся непотенциальными. Учет непотенциальности приводит к выводу об отражении ЭБВ от этой поверхности. Если зависимость магнитного поля от большого радиуса немонотонна, что характерно для токамаков с малым аспектным отношением, то, как показано в диссертации, становятся возможными собственные ЭБВ, запертые между поверхностями ЭЦР.

Глава 4 диссертации посвящена развитию теории распадной неустойчивости электронных циклотронных волн (ЭЦВ) в токамаке. Стимулом к этому послужили эксперименты, в которых ЭЦ нагрев сопровождался нагревом ионов и появлением отраженной волны. Эти явления не укладывались в существовавшую теорию, в которой порог распадной неустойчивости определялся выносом энергии из области распада вторичными волнами. В разделе 4.1 объяснение экспериментальных результатов автор диссертации основывает на том, что они

наблюдались лишь при немонотонной радиальной зависимости плотности плазмы. Благодаря этому область прозрачности ионных бернштейновских волн (ИБВ), возникающих при распаде ЭЦВ ограничивается по радиусу, что предотвращает вынос энергии в данном направлении. Показано также, что локализация ИБВ в полоидальном направлении обязана полоидальному магнитному полю. Существование тороидального волновода для ИБВ следует из вида лучевых траекторий, а также подтверждается анализом упрощенного волнового уравнения. Критерий развития распадной неустойчивости определяется балансом нелинейной накачки энергии в ИБВ и ее выносом в тороидальном направлении. Полученный критерий согласуется с экспериментальными данными. В том случае, если ИБВ не успевают поглотиться за время пробега по тороиду, они принимают вид собственных мод трехмерного тороидального резонатора. Естественно, что при этом порог неустойчивости снижается. В разделе 4.2 показано, что в распаде ЭЦВ на ИБВ и отраженную волну последняя может быть заменена ЭБВ. Как и в первом случае, распадная неустойчивость имеет конвективный характер при сильной диссипации и абсолютный при слабой.

Уход волн, участвующих в трехволновом взаимодействии, определяет условия распадной неустойчивости в стандартной теории. Данный фактор перестает действовать, если область прозрачности волн, возникающих при распаде, ограничена в пространстве. В разделе 4.3 показано, что в токамаке плазменные образования, ограниченные по всем трем направлениям, являются резонаторами для ЭБВ. Такие образования могут возникать вследствие турбулентности, обычно присутствующей в плазме токамака. Анализ лучевых траекторий ЭБВ подтвердил предположение о том, что их область прозрачности ограничена окрестностью максимумов плотности плазмы. Собственные колебания данного объема рассмотрены в предположении иерархии частот, из которых наименьшей является частота осцилляций вдоль магнитного поля, следующей по величине – частота радиальных осцилляций, и наибольшей – частота осцилляций по направлению, ортогональному к двум предыдущим. Учтено, что удержание ЭБВ в радиальной «потенциальной яме» не является абсолютным, и из нее происходит отток энергии. В заключение раздела 4.3 рассмотрен распад ЭЦВ, в котором участвует ЭБВ, локализованная в окрестности максимума плотности плазмы.

В разделе 4.4 представлена альтернативная картина распадной неустойчивости при нагреве на второй гармонике ЭЦ частоты с помощью необыкновенной волны. Она основана на том, что отраженная волна наблюдалась в том случае, если частота падающей волны примерно равнялась удвоенной верхнегибридной (ВГ). В этом случае становится возможным распад электромагнитной ЭЦВ на две потенциальные ВГ с близкими частотами. При немонотонном радиальном распределении плотности плазмы область прозрачности ВГ волн ограничена по радиусу, но они могут вытекать из области распада по другим направлениям. Однако, если амплитуда ЭЦВ достаточно велика, то такие потери не могут остановить распадную неустойчивость, и она становится абсолютной. Данный вывод следует из характера лучевых траекторий, а также из анализа решений упрощенного волнового уравнения.

Далее рассматривается механизм насыщения абсолютной распадной неустойчивости. Он обязан распаду первичной ВГ волны на вторичную ВГ и НГ. Такая возможность реализуется, если в окрестности максимума плотности, что необходимо для локализации ВГ волны, имеется минимум, к которому «привязана» НГ волна. Если перепад плотности плазмы в окрестности максимума достаточно велик, то цепочка распадов ВГ волны на ВГ и НГ может быть продолжена. Волны, возникающие при распадах, свободно уходят в полоидальном и тороидальном направлениях, что ведет к стабилизации всего каскада распадов и выходу процесса на стационар. Если пучок электромагнитных волн имеет малый поперечный размер, и, следовательно, его

спектр по волновым числам вдоль магнитного поля достаточно широк, то вынос энергии НГВ в этом направлении препятствует развитию описанного каскада. В этом случае их место занимают ИБВ.

В заключительной части 4 главы рассмотрен процесс слияния ВГВ в отраженную электромагнитную волну. С помощью результатов предыдущих разделов и теоремы взаимности найден спектр отраженного сигнала. Расчеты адаптированы к экспериментам на токамаке TEXTOR. Найдено, что как амплитуда отраженных волн, так и их спектр согласуются с данными эксперимента.

Замечания: 1. При анализе доплеровской рефлектометрии следовало бы пояснить, как на эту диагностику повлияет рефракция зондирующего излучения, вызванная движением плазмы. 2. В слабо столкновительной плазме столкновения влияют на поглощение электромагнитных волн главным образом посредством уширения линий бесстолкновительного резонансного поглощения. Это положение не согласуется с выражением (4.10). 3. В диссертации имеются опечатки: на стр. 39 неверно указан номер раздела, на стр. 66 слово «уменьшение» следует заменить на «увеличение», на стр. 68 в формуле (1.141) имеется опечатка, на стр. 193 диссертация названа статьей, на стр. 212 непотенциальные колебания – потенциальными.

Суммируя содержание отзыва, укажем, что в диссертации А.Ю. Попова решен ряд актуальных задач современной теории плазмы, в том числе проведены пионерские исследования трансформации волн в двумерно неоднородной плазме и распадного взаимодействия в плазме с немонотонным пространственным распределением плотности. Замечания, указанные в отзыве, не затрагивают основного содержания диссертации. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям по специальности 01-04-08 – физика плазмы. Содержание диссертации верно отражено в автореферате. Ее автору, А.Ю. Попову, может быть присуждена ученая степень доктора физ.- мат. наук.

Главный научный сотрудник
Курчатовского комплекса физико-химических технологий
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»,
(123182 Россия, Москва, площадь Академика Курчатова, д.1,
тел.: +7 (499) 196 99 05, e-mail: Timofeev_AV@nrcki.ru),

доктор физ.- мат. наук, профессор

(А.В.Тимофеев)

Подпись А.В.Тимофеева заверяю

Главный ученый секретарь Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

(С.Ю.Стремоухов)

25 января 2016г.