

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Хусаинова Тимура Айратовича
"РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ В
НЕОДНОРОДНОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

Дополнительный нагрев плазмы с использованием мощных пучков СВЧ волн широко применяется в настоящее время как в тороидальных магнитных ловушках, так и в линейных установках. Эффективность и привлекательность этого метода базируется на использовании надежных генераторов, - гиротронов, - которые позволяют возбуждать пучки ЭЦ волн с мощностью от 100 кВт до 1МВт в каждом. Описание распространения и профиля энерговыделения этих волн в установках со сложной геометрией магнитного поля является важной прикладной задачей. В частности, реализация эффективного ЭЦ нагрева плотной плазмы в больших открытых ловушках (таких как установке ГДЛ в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера) требует некоторого пересмотра сложившихся представлений как о физике циклотронного взаимодействия, так и о последующем транспорте энергии и стабилизации плазменного шнура, поскольку ни одна из используемых на практике схем нагрева тороидальной плазмы не работает в этом случае.

В ряде установок, где плотность плазмы выше критической, традиционная схема нагрева при вводе пучка СВЧ волн со стороны слабого магнитного поля сталкивается с проблемой доставки излучения в центральную часть плазменного шнура в область электронного циклотронного резонанса. В этом случае обычно используют более изощренную схему нагрева, основанную на двукратной линейной трансформации электромагнитных волн, в результате которой возбуждаются электростатические электронные бернштейновские волны, которые могут свободно распространяться в плазме и полностью поглощаются в ЭЦ резонансном слое. Данная схема нагрева плазмы была реализована экспериментально на таких тороидальных установках, как Wendelstein 7-AS, MAST, TCV, FTU, LHD и других. Причем, измеренная экспериментально эффективность этого метода нагрева во всех случаях оказалась значительно ниже предсказанной, что дало импульс к более детальным теоретическим исследованиям. Отметим, что ключевым элементом этой схемы, позволяющей возбуждать электронные бернштейновские волны, является линейная трансформация нормальных мод в окрестности критической поверхности. До последнего времени не все эффекты, связанные как с реальной неоднородностью плазмы, так и с наличием низкочастотной турбулентности, были учтены в теоретических моделях. Это делает актуальной задачу линейной трансформации обыкновенной волны в необыкновенную волну как с теоретической, так и с прикладной точки зрения.

Поставленные задачи были успешно решены диссертантом. Их решение изложено в трех главах диссертационной работы. В её первой главе развивается теория линейного взаимодействия обыкновенной (O) и необыкновенной (X) волн электронно-циклотронного диапазона в тороидальных магнитных ловушках. В рамках двух независимых подходов исследуется влияние особенностей геометрии равновесной конфигурации плазмы на эффективность O-X трансформации. Первый подход предлагает учет глобальной тороидальной структуры области взаимодействия волн в модельной среде, второй напротив стремится к максимально правдоподобному описанию плазмы и магнитного поля в магнитных ловушках, пусть и в ограниченной области. Во второй главе анализируется влияние флуктуаций плотности плазмы на эффективность O-X трансформации. Показано как эффективность может меняться из-за рассеяния O-волны до области трансформации или из-за непосредственного возмущения коэффициента связи между взаимодействующими волнами. Отдельно исследуется влияние малоуглового рассеяния, накапливающегося на большей

части трассы пучка в плазме, и влияние обратного брэгговского рассеяния, которое возникает вблизи поверхностей отсечки. Третья глава посвящена моделированию резонансного СВЧ нагрева плазмы в крупномасштабной прямой ловушке в рамках последовательного квазиоптического приближения для уравнений Максвелла. Такой подход позволяет моделировать распространение электромагнитных волновых пучков СВЧ диапазона, одновременно учитывая эффекты дифракции, резонансной диссипации, сильной пространственной дисперсии и пространственной неоднородности.

Надо отметить, что в целом диссертационная работа представляет собой существенный вклад в развитие теории распространения и трансформации волн в слабонеоднородной плазме. В ней впервые получен целый ряд новых практически важных результатов

1) Решена модельная задача в теории линейного взаимодействия обыкновенной и необыкновенной волн ЭЦ диапазона частот в неоднородной в окрестности критической поверхности, которая учитывает глобальную тороидальную геометрию магнитного поля и плазмы.

2) Обнаружен новый эффект, сильно влияющий на эффективность линейной трансформации нормальных волн ЭЦ диапазона частот. Показано, что эффективность трансформации существенно снижается, если поверхность фазового фронта медленной огибающей волнового пучка отличается от оптимальной, которая в установках с большим аспектным отношением с высокой точностью совпадает с поверхностью критической концентрации.

3) Показано, что поляризационное вырождение нормальных волн подавляет эффект усиления обратного брэгговского рассеяния электромагнитных волн на флуктуациях плотности плазмы в окрестности области отсечки.

4) Получено новое выражение для эффективности туннелирования волнового пучка со случайной фазовой модуляцией через неоднородную область непрозрачности в окрестности поверхности плазменной отсечки в тороидальной магнитоактивной плазме.

5) На основе усовершенствованного квазиоптического подхода разработан универсальный численный код для моделирования распространения электромагнитных волновых пучков СВЧ диапазона в открытых магнитных ловушках.

6) Впервые в рамках квазиоптического подхода было проведено исследование эффективных способов ЭЦ нагрева плазмы в крупномасштабной открытой ловушке.

Основные результаты получены с использованием современных хорошо обоснованных математически аналитических и численных методов решения электродинамических задач, что обеспечивает их достоверность. Результаты диссертации отражены в ведущих реферируемых иностранных и отечественных журналах из списка ВАК, таких как Физика плазмы, Журнал экспериментальной и теоретической физики, Вопросы атомной науки и техники, Plasma Physics and Controlled Fusion, Physics of Plasmas. Материалы диссертации докладывались на международных конференциях и семинарах. Они хорошо известны специалистам, что также подтверждает их достоверность. В частности, по материалам кандидатской диссертации Т.А. Хусаиновым был сделан доклад на научном семинаре в ФТИ. им. А.Ф. Иоффе РАН, который получил высокую оценку слушателей.

Следует отметить, что диссертационная работа производит очень хорошее впечатление. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для повышения эффективности использования мощных генераторов микроволнового излучения в термоядерных исследованиях. Построенная в работе теория линейной трансформации волновых пучков позволяет повысить эффективность СВЧ нагрева магнитоактивной плазмы с плотностью выше критической (тороидальные установки Т-15, Wendelstein 7-X, Глобус-М2, MAST, NSTX). Квазиоптическое моделирование электронного циклотронного нагрева плазмы в прямой магнитной ловушке уже

используется при планировании эксперимента в осесимметричной газодинамической ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН, Новосибирск).

Основные результаты, представленные в диссертации, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Вклад соискателя состоял в аналитическом и численном исследовании уравнений для электрического поля электромагнитных волн.

Тем не менее, диссертационная работа несвободна от недостатков, делающих необходимыми следующие замечания.

1. В первой главе при решении «глобальной» задачи в присутствии периодического потенциала (рисунок 1.2) естественно было бы ожидать наличие щели в спектре разрешенных собственных функций. В качестве примера можно привести наличие щели в спектре глобальных альфвеновских мод. К сожалению, этот физический эффект не обсуждается в диссертационной работе.

2. При решении задачи о линейной трансформации нормальных мод в окрестности критической поверхности с учетом глобальной тороидальной структуры было бы разумным показать предельный переход от коэффициента прохождения, найденного в этом приближении, к коэффициенту прохождения, полученному ранее в плоскостром случае.

3. В разделе 1.5 задача линейного взаимодействия О-Х волн рассматривается в рамках альтернативного подхода, позволяющего описывать плазму в магнитной конфигурации общего вида с произвольной кривизной магнитной поверхности и неоднородностью модуля и направления магнитного поля. По сути, решается локальная задача, в рамках которой плотность плазмы и магнитное поле задаются при помощи локальных разложений с девятью независимыми скалярными параметрами. Показано, как при помощи фазовых замен и перехода в криволинейную систему координат систему уравнений Максвелла можно свести к упрощенной базовой системе уравнений только с тремя управляющими параметрами. Отметим, что ключевым моментом при выводе этой системы является удержание в ней только членов первого порядка малости, что, в частности, позволило не учитывать зависимость коэффициентов Ламэ от координат. К сожалению, переменные в полученной системе уравнений не разделяются. Причиной этого являются члены, которые описывают шир магнитного поля. Представляется, что диссертант использует математически не вполне последовательный подход при решении базовой системы уравнений, считая эти члены малыми по сравнению с остальными. При подобном подходе надо учитывать и другие члены второго порядка малости, отброшенные им при получении системы «укороченных» уравнений.

4. В главе 2 показано, что после усреднения по случайным реализациям профилей плотности плазмы при условиях, отвечающих эффективной линейной трансформации, характерного для общего случая усиления обратного брэгговского рассеяния в области отсечки не происходит. Представляется, что данный вывод остается справедливым только в рамках одномерной модели, т.е. в частном случае рассеяния на флуктуациях с бесконечной корреляционной длиной в y – направлении, что очевидно при анализе системы уравнений 2.12. Было бы разумным дать оценку характерных «полоидальных» волновых векторов флуктуаций, при которых происходит переход от квазиодномерного предела, т.е. случая «поляризационного вырождения», к пределу, при котором функция Грина уравнения 2.12 «подчеркивает» вклад окрестности критической концентрации в рассеяние обыкновенной волны, распространяющейся под оптимальным углом.

Сделанные замечания носят частный характер, не затрагивают основных результатов диссертации и положений, выносимых на защиту, и не снижают высокой оценки диссертационной работы. Содержание диссертационной работы верно отражено в автореферате.

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

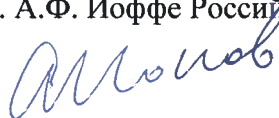
Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, с.н.с.

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

(ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)



/Попов Алексей Юрьевич

194021, г. С.-Петербург,

ул. Политехническая, 26

Тел. 8-(812) 297 2245

Моб. +7-(906)-277-80-72

e-mail: a.popov@mail.ioffe.ru

Подпись Попова А.Ю. заверяю,

ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

д.ф.м.н.



А.П. Шергин