

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.069.02 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 19.06.2017 № 65

О присуждении Хусаинову Тимуру Айратовичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Распространение и трансформация электромагнитных волновых пучков в неоднородной магнитоактивной плазме» по специальности 01.04.08 (физика плазмы) принята к защите 12.04.2016, протокол № 64, диссертационным советом Д 002.069.02 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН; 603950, г. Нижний Новгород, бокс-120, ул. Ульянова, д. 46), приказ о создании совета № 717/нк от 09.11.2012.

Соискатель — Хусаинов Тимур Айратович, 1990 года рождения. В 2013 году соискатель окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», работает младшим научным сотрудником в ИПФ РАН.

Диссертация выполнена в отделе нелинейной электродинамики ИПФ РАН.

Научный руководитель — Шалашов Александр Геннадиевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий сектором СВЧ методов нагрева плазмы ИПФ РАН.

Официальные оппоненты:

1. Грач Савелий Максимович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ);

2. Попов Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики высокотемпературной плазмы, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН), в своем положительном заключении, подписанном Скворцовой Ниной Николаевной, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником отдела физики плазмы ИОФ РАН, указала, что диссертация Т. А. Хусаинова является законченной научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в развитие теории распространения и трансформации электромагнитных волн в установках с магнитным удержанием плазмы; что задачи и содержание работы отвечают паспорту специальности 01.04.08 – физика плазмы; что работа отвечает критериям пункта 9 «Положения о порядке присвоения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы».

Соискатель имеет 12 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 6 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, и 6 работ в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов. Вклад соискателя во все опубликованные работы является определяющим.

#### **Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:**

1. *Gospodchikov E. D., Khusainov T. A., Shalashov A. G.* Impact of poloidal curvature on linear mode conversion of quasi-optical wave beams in tokamak plasmas // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2012. V. 54(4). P. 045009.

2. *Господчиков Е. Д., Хусаинов Т. А., Шалашов А. Г.* Ослабление обратного брэгговского рассеяния электромагнитных волн на флуктуациях плотности в окрестности области поляризационного вырождения в магнитоактивной плазме // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42, №. 8. С. 695–706.

3. *Шалашов А. Г., Балакин А. А., Хусаинов Т. А., Господчиков Е. Д., Соломахин А. Л.* Квазиоптическое моделирование ЭЦ нагрева плазмы в прямой магнитной ловушке // *ЖЭТФ*. 2017. Т. 151. №. 2. С. 379–395.

На диссертацию и автореферат поступило 5 отзывов. Все отзывы положительные. В них отмечают актуальность диссертации, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Отзыв ведущей организации** содержит следующие замечания. 1) На стр. 57-58 диссертации указано, что несовпадение волнового фронта электромагнитного волнового пучка и поверхности критической концентрации является причиной снижения эффективности О-Х трансформации. Однако их совпадение невозможно в принципе, так как волновой вектор в области трансформации направлен вдоль внешнего магнитного поля и указанные поверхности ортогональны. Поэтому оптимальная кривизна волнового фронта О-волны должна быть определена на некотором расстоянии от области трансформации, а не в ней. 2) На стр. 59 упоминается фазовое замедление волны вблизи области отсечки. Но если речь идет о фазовой скорости волны, то она, наоборот, вблизи области отсечки возрастает.

**Отзыв официального оппонента д. ф.-м. н., проф. С. М. Грача** содержит следующие замечания. 1) Отмечается некоторая небрежность в использовании терминологии. В частности, для величины индукции постоянного во времени магнитного поля в установке в первой главе используется термин «амплитуда»; в первой главе используется термин «область линейного взаимодействия», а во второй - «область поляризационного вырождения» без пояснения, что это суть одно и то же; в третьей главе говорится о плотной и разреженной плазме, но не поясняется, какой физический смысл вкладывается в эти термины. 2) Поскольку диссертация является развитием предыдущих исследований, она выиграла бы при наличии краткого обзора с включением, в том числе, более подробного описания О-Х-В схемы, схемы экспериментов в прямой ловушке, параметров установок

магнитного удержания, для которых могут быть использованы полученные результаты, а также более подробного обоснования малой эффективности нелинейных эффектов при СВЧ нагреве плазмы.

**В отзыве официального оппонента д. ф.-м. н. А. Ю. Попова** сделаны 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 плоскостом 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.

**В отзыве на автореферат от д. ф.-м. н., проф. А. В. Тимофеева не содержится замечаний.**

**Отзыв на автореферат от к. ф.-м. н. А. Л. Соломахина** отмечает наличие опечаток в описании структуры и объема диссертации и в списке работ по теме диссертации.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован тем, что оппоненты являются признанными высококвалифицированными специалистами в области физики плазмы, а одним из важнейших направлений деятельности ведущей организации является исследование плазмы в установках с магнитным удержанием.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– Построена теория линейного взаимодействия обыкновенной и необыкновенной волн ЭЦ диапазона частот в неоднородной магнитоактивной плазме в окрестности поверхности критической концентрации, учитывающая глобальную тороидальную геометрию токамака – кривизну силовых линий магнитного поля, неоднородность напряженности магнитного поля и постоянство давления плазмы на магнитных поверхностях.

– Исследованы особенности обратного рассеяния электромагнитного излучения на флуктуациях плотности в условиях поляризационного вырождения нормальных волн в магнитоактивной плазме.

– Разработан численный код для моделирования распространения и поглощения электромагнитных волновых пучков СВЧ диапазона в открытых магнитных ловушках, который позволяет учитывать эффекты дифракции, сильной пространственной дисперсии и пространственной неоднородности.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

– Исследовано влияние формы фазового фронта падающего волнового пучка электронного циклотронного диапазона частот на эффективность его линейной трансформации в тороидально-неоднородной магнитоактивной плазме.

– Доказано, что поляризационное вырождение нормальных волн в магнитоактивной плазме подавляет известный эффект усиления обратного брэгговского рассеяния в окрестности области отсечки для электромагнитных волн, рассеивающихся на флуктуациях плотности плазмы.

– Предложено новое квазиоптическое уравнение для эволюции медленной амплитуды волнового пучка в стационарной плавнонеоднородной среде с пространственной дисперсией и диссипацией.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

– Построенная в работе теория линейной трансформации волновых пучков может быть использована для повышения эффективности СВЧ нагрева магнитоактивной плазмы с плотностью выше критической (для распространения электромагнитных волн) в перспективных тороидальных магнитных ловушках таких как ITER (ITER, Cadarache), W 7-X (IPP, Greifswald), T-15МД (Курчатовский институт, Москва).

– Квазиоптическое моделирование электронного циклотронного нагрева плазмы в прямой магнитной ловушке используется при планировании эксперимента в осесимметричной газодинамической ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН, Новосибирск).

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

– Теория построена на основе уравнений электродинамики плазмы;

- Установлено качественное и количественное совпадение результатов соискателя с результатами, представленными в независимых источниках для частных случаев.
- Используются апробированные методы решения задач физики плазмы.

**Личный вклад соискателя** состоит в аналитическом и численном исследовании уравнений для электрического поля электромагнитных волн. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя и соавторов. Все численные расчеты выполнены автором диссертации лично. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем.

На заседании 19.06.2016 диссертационный совет принял решение присудить Т. А. Хусаинову ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 21, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя  
диссертационного совета  
академик РАН

А. Г. Литвак

И.о. ученого секретаря диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук, профессор

А. И. Смирнов

Подписи А. И. Смирнова и А. Г. Литвака заверяю:  
ученый секретарь ИПФ РАН  
кандидат физ.-мат. наук

И. В. Корюкин

19 июня 2016 г.