

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук (ИОФ РАН)

№ 11219-9311-1117
31.05.17

№



И.А. Щербаков

2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук на диссертационную работу Хусаинова Т.А. «Распространение и трансформация электромагнитных волновых пучков в неоднородной магнитоактивной плазме», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Диссертация Хусаинова Тимура Айратовича «Распространение и трансформация электромагнитных волновых пучков в неоднородной магнитоактивной плазме» посвящена развитию теории распространения и трансформации СВЧ электромагнитных волн электронно-циклотронного (ЭЦ) диапазона частот в плазме магнитных ловушек. Метод ЭЦ резонансного нагрева, основанный на эффективном поглощении плазмой СВЧ волн данного диапазона, является в настоящее время одним из основных методов нагрева плазмы в тороидальных и открытых магнитных ловушках. Это связано не только с активным развитием мощных источников излучения, линий передачи и квазиоптических систем управления излучением, но и с расширением возможностей нагрева плотной плазмы с использованием эффекта трансформации электромагнитных волн в специфически-плазменные электронные бернштейновские (ЭБ) волны. Поэтому изучение электродинамики СВЧ волновых процессов в средах с анизотропией, гиротропией, пространственной

дисперсией и резонансной диссипацией при учете неоднородности общего вида (характерной для плазмы в реальных установках) является актуальной научной проблемой для физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

Диссертация состоит из введения, трех глав, и заключения. Первые две главы посвящены развитию теории линейного взаимодействия обыкновенной (O-) и необыкновенной (X-) волн ЭЦ диапазона (O-X трансформации) в стационарной и турбулентной плазме. В первой главе исследуется влияние особенностей геометрии распределения плазмы и магнитного поля на эффективность трансформации в рамках двух отдельных подходов. В рамках первого подхода используется глобально-тороидальная модель равновесия магнитоактивной плазмы (характерная, например, для классических токамаков), а второй сосредоточен на локальных свойствах магнитной конфигурации в области трансформации и допускает разнообразные типы глобальной геометрии плазмы. В обоих случаях получены системы укороченных волновых уравнений, описывающих распределение электрического поля в окрестности области трансформации. Получены аналитические решения этих систем, которые в предельных случаях переходят в известные ранее решения, и проведен качественный анализ новых результатов. В частности, подтверждено аналитически, что кривизна волнового фронта O-волны, приближающейся к области трансформации, может существенно влиять на эффективность ее трансформации в X-волну и, следовательно, на эффективность генерации ЭБ волн.

Во второй главе рассматривается влияние флуктуаций плотности плазмы на эффективность O-X трансформации, а именно влияние рассеяния назад падающей O-волны, возможное нарушение связи между модами и роль малоуглового рассеяния на флуктуациях. Показано, что флуктуации не только не приводят к рассеянию проходящей волны назад, но из-за поляризационного вырождения в области трансформации даже уменьшают (в среднем) коэффициент нежелательного отражения и повышают эффективность O-X трансформации за счет рассеяния отраженной волны. Эти аналитические результаты сверены с численными решениями укороченных волновых уравнений. В итоге сделан вывод, что флуктуации могут существенно влиять на эффективность O-X трансформации только за счет малоуглового рассеяния, которое накапливается на всей трассе O-волны в плазме и в области трансформации добавляет нежелательную случайную фазовую модуляцию.

Третья глава посвящена численному моделированию ЭЦ нагрева плазмы в крупной прямой ловушке. В этом сценарии не используется трансформация волн; нагрев происходит за счет резонансного поглощения X-волны, запертой в приосевой области плотной плазмы. Для моделирования распространения и поглощения волнового пучка выбран

квазиоптический подход, представляющий собой вычислительный метод, промежуточный по сложности (и полноте учета волновых эффектов) между лучевыми расчетами и интегрированием полной системы волновых уравнений. Автором предложен более общий вид дифференциального квазиоптического оператора, чем тот, который ранее использовался для расчетов в тороидальной геометрии и оказался не корректен для данного сценария. Описаны особенности численного кода, реализующего модифицированный квазиоптический метод. Приведены результаты численного моделирования ЭЦ нагрева плазмы в крупной газодинамической ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН), которые в основном совпадают с результатами проведенного ранее многолучевого моделирования. Кроме того, автором продемонстрирован и новый сценарий более равномерного ЭЦ нагрева всего объема плазмы в ГДЛ.

Имеются 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 наоборот вблизи области отсечки возрастает.

Оба замечания касаются лишь употребления неудачной терминологии и не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в развитие теории распространения и трансформации электромагнитных волн в установках с магнитным удержанием плазмы. Результаты диссертационных исследований отражены в 12 опубликованных работах (6 из них – статьи в научных журналах). Автореферат полностью соответствует всем требованиям ВАК и отражает содержание диссертационной работы. Диссертация Хусаинова Т.А. «Распространение и трансформация электромагнитных волновых пучков в неоднородной магнитоактивной плазме» соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Хусаинов Тимур Айратович,

заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Доклад Хусаинова Т.А., отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на заседании Ученого совета Отдела физики плазмы ИОФ им. А.М. Прохорова РАН 23 мая 2017 г.

Работа получила единогласную положительную оценку членов Ученого совета, протокол № 436 от 23 мая 2017 г.

Отзыв составила:

Ведущий научный сотрудник отдела физики плазмы
Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
доктор физико-математических наук



Скворцова Нина Николаевна

тел. (499)135-8039, e-mail mukudori@mail.ru

Председатель Ученого совета отдела физики плазмы
Заведующий отделом физики плазмы
Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
кандидат физико-математических наук



Вячеслав Алексеевич Иванов

«23» мая 2017 г.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.