

ОТЗЫВ

официального оппонента Грача Савелия Максимовича – доктора физико-математических наук, профессора кафедры радиоастрономии и распространения радиоволн Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского на диссертацию Хусаинова Тимура Айратовича «Распространение и трансформация электромагнитных волновых пучков в неоднородной магнитоактивной плазме», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа Т.А. Хусаинова посвящена исследованиям различных аспектов проблемы увеличения эффективности нагрева плотной плазмы в системах с магнитным удержанием за счет ввода в плазму квазиоптического пучка электромагнитных волн миллиметрового диапазона. При этом возбуждение поглощающихся в области электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) бернштейновских волн (и, следовательно, нагрев плазмы) может осуществляться за счет линейной трансформации электромагнитных волн в неоднородной плазме и их распространения в область ЭЦР. Наибольшее распространение получила так называемая схема О-Х-В трансформации, когда излучение вводится в плазму со стороны слабого магнитного поля в виде обыкновенной (О) волны, достигает окрестности критической магнитной поверхности, где частота излучения близка к электронной плазменной и при правильном выборе направления инжекции частично трансформируется в необыкновенную (Х) волну. При дальнейшем распространении Х волна достигает области ее трансформации в электронную бернштейновскую (В) моду. Эффективность О-Х-В конверсии в значительной степени определяется эффективностью его первой стадии (О-Х трансформацией), поскольку после неё волна оказывается заперта в плотной плазме. В диссертации последний процесс исследуется теоретически при различных распределениях концентрации плазмы и геометрии магнитного поля, близких к реальным в системах с магнитным удержанием, посвящены две главы диссертации. Большой интерес представляет применение ЭЦ нагрева в открытых магнитных ловушках, которое до недавнего времени было ограничено либо относительно компактными лабораторными установками. Исключения представляют собой серия экспериментов 1980-х гг. на установке ТМХ-У в Ливерморе (США) и недавние эксперименты на плазменном стенде ГДЛ (газодинамическая ловушка) в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). В результате этих исследований впервые была убедительно продемонстрирована перспективность использования магнитных ловушек открытого типа с осесимметричной конфигурацией в качестве нейтронных источников для термоядерных приложений. В диссертации Т.А. Хусаинова приведены результаты моделирования резонансного СВЧ нагрева плазмы в крупномасштабной прямой ловушке. Таким образом, актуальность выбранного направления исследований, обусловленная, в первую очередь, проблемой управляемого термоядерного синтеза, сомнений не вызывает.

Диссертация состоит из Введения, трех глав и заключения. Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, определена его научная новизна, практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы развивается теория линейного взаимодействия волновых пучков с учетом особенностей распределения плазмы и магнитного поля в тороидальных магнитных ловушках, в частности, двумерной неоднородности среды. Основной упор делается на анализ роли кривизны магнитных поверхностей, которая ранее игнорировалась. В главе подробно исследуется влияние кривизны на примере модельной среды, приближенной к классическому токамаку, в которой магнитное поле направлено вдоль оси тора. При этом учитывается вся тороидальная область поляризованного вырождения в токамаке, но в пренебрежении полоидальным магнитным полем, а полученные решения строятся только в малой окрестности области линейной трансформации. Выведена система укороченных уравнений для медленно меняющейся амплитуды электрического поля и её решение, учитывающие влияние кривизны силовых линий магнитного поля, неоднородности напряженности магнитного поля и постоянства давления плазмы на магнитных поверхностях. Обнаружен новый эффект, связанный с кривизной магнитных поверхностей: показано, что

эффективность трансформации снижается, когда 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. Этот эффект может объяснить низкую эффективность нагрева за критической плазмы в токамаках и стеллараторах, систематически наблюдающуюся в большинстве экспериментов по линейной конверсии внешнего электромагнитного излучения в В моду. Такое снижение было наглядно продемонстрировано на примере расчета коэффициента трансформации для пучков, используемых на токамаке FTU (Италия), для которого кривизна фазового фронта делает О-Х-В нагрев на FTU практически невозможным, снижая коэффициент О-Х трансформации до уровня 10%. В то же время негативное влияние кривизны может быть полностью скомпенсировано оптимальной фокусировкой волнового пучка. В заключительном разделе главы задача О-Х трансформации вблизи поверхности критической концентрации решена для среды общего вида, способной адекватно описывать магнитные конфигурации сферических токамаков и оптимизированных стеллараторов. При этом показано, что при помощи фазовых замен, определяющихся кривизной магнитных поверхностей и неоднородностью магнитного поля, можно свести общую задачу к уже рассмотренной с плоскими пересекающимися поверхностями отсечки и широм. Фазовые замены, в свою очередь, определяют оптимальную форму для поверхности фазового фронта медленной огибающей волнового пучка, которая в может существенно отличаться от поверхности критической концентрации. Показано, что форма оптимальной поверхности может существенно зависеть от направления ввода излучения вдоль или против магнитного поля, что следует учитывать при оптимизации нагрева и интерпретации данных эксперимента.

Во второй главе диссертации исследованы особенности брэгговского рассеяния О-волны вблизи области О-Х трансформации (в условиях поляризационного вырождения нормальных волн) плазме. Показано, что в отличие от случая, когда различные нормальные волны (О и Х) связаны слабо, в случае поляризационного вырождения, отвечающего эффективной линейной трансформации, для волн, запущенных под углом к магнитному полю, и после усреднения по случайным реализациям профилей плотности плазмы усиления брэгговского рассеяния вблизи поверхности отсечки не происходит. В то же время, среднеквадратичное отклонение случайного коэффициента отражения всегда оказывается много больше возмущения его среднего значения. Среднеквадратичное отклонение коэффициента отражения может достигать десятков процентов даже при умеренных, порядка 1%, величинах флуктуаций плотности. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при диагностике температуры плазмы, основанной на регистрации излучения электронных бернштейнских волн.

Третья глава посвящена моделированию резонансного СВЧ нагрева плазмы в крупномасштабной прямой ловушке в рамках последовательного квазиоптического приближения для уравнений Максвелла. Здесь дан общий обзор квазиоптического приближения, описывается методика перехода от уравнений Максвелла для векторных полей к задаче на скалярную амплитуду, выводится операторное уравнение, задающее изменение скалярной амплитуды волнового пучка вдоль оси ловушки, вводится выражение для плотности поглощенной СВЧ мощности, рассматриваются условия применимости квазиоптического подхода, описывается процедура выбора адекватного представления квазиоптического оператора (гамильтониана), определяющего эволюцию волнового пучка. На основе усовершенствованного квазиоптического подхода разработан численный код для моделирования распространения электромагнитных волновых пучков СВЧ диапазона в открытых магнитных ловушках, который позволяет одновременно учитывать эффекты дифракции, резонансной диссипации, сильной пространственной дисперсии и пространственной неоднородности. Приведены первые результаты квазиоптического моделирования профилей распределения поглощенной СВЧ мощности для крупномасштабной газодинамической ловушки (ГДЛ). При этом были подтвердили результаты, полученные ранее с помощью геометрооптического моделирования для уже реализованных в эксперименте сценариев ЭЦ нагрева. Предложен новый, улучшенный сценарий ЭЦ нагрева плазмы в ГДЛ, в котором реализуется равномерный нагрев всего объема плазмы в магнитной ловушке.

В Заключении приведены основные результаты работы.

Диссертация Т.А. Хусаинова производит хорошее впечатление. Ее результаты являются продолжением и развитием усилий группы исследователей в области поисков наиболее эффективного ввода энергии в плазму с магнитным удержанием, способствуют прогрессу в различных аспектах проблемы. В диссертации использованы современные математические методы. Не вызывает сомнений значительный личный вклад автора при получении результатов работы, который заключался в аналитическом и численном исследовании уравнений для электрического поля электромагнитных волн. Достоверность результатов обеспечивается адекватностью применяемых методов и то, что они подтверждаются полученными ранее другими методами. Результаты работы используются для интерпретации экспериментов на различных установках с магнитным удержанием плазмы, а также для выработки рекомендаций для новых экспериментов, в частности, на FTU и ГДЛ, могут быть использованы для повышения эффективности использования мощных генераторов микроволнового излучения в термоядерных исследованиях.

Диссертационная работа не лишена недостатков. Во-первых, следует отметить некоторую 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 поляризованного 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. Далее, 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.

Указанные недостатки не являются принципиальными и не могут изменить общей высокой оценки диссертационной работы. В целом, диссертация Т.А. Хусаинова представляет собой законченное научное исследование в области распространения взаимодействия электромагнитных волн и их линейного взаимодействия в системах с магнитным удержанием плотной плазмы.

Научные положения и выводы работы обоснованы тщательностью и адекватностью теоретического анализа и их сопоставления с данными экспериментов. Новизна и обоснованность научных положений и выводов работы подтверждается их публикацией в 6 статьях в ведущих российских (входящих в соответствующий перечень ВАК) и зарубежных научных журналах, их апробацией на конференциях и семинарах в России и за рубежом. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Считаю, что диссертация Т. А. Хусаинова «Распространение и трансформация электромагнитных волновых пучков в неоднородной магнитоактивной плазме» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.08 – физика плазмы, а ее автор Тимур Айратович Хусаинов безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

доктор физ.-мат. наук, профессор,

профессор кафедры РА и РРВ

радиофизического факультета ННГУ

Адрес: Россия, 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина 23, ННГУ.

Тел. (831) 4656127; e-mail: sgrach@f.unn.ru



С. М. Грач

Подпись С. М. Грача ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ННГУ

Л. Ю. Черноморская