

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию СДВИЖЕНСКОГО Петра Александровича «**Разработка методов решения задач нелокального переноса излучения и спектроскопической диагностики плазмы**», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Диссертация П.А. Сдвиженского является оригинальной исследовательской работой, в которой решены три задачи, объединенные тематически и методически: это задачи по теории радиационных (излучательных) процессов в плазме, при решении каждой поставленной задачи проводится разработка нового расчетно-теоретического метода, и проведенные исследования мотивированы практическими задачами физики плазмы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. В рукописи 119 страниц, 38 рисунков и 17 таблиц, в списке литературы 85 публикаций. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Актуальность темы.

Поставленные перед диссертантом задачи являются актуальными для исследований лабораторной и астрофизической плазмы. Моделирование переноса резонансного излучения в плазме является настолько трудоемкой задачей, что от теории требуется как разработка методов, упрощающих численные расчеты, так и получение решений таких модельных задач, которые могут служить эталоном при проверке точности численных кодов «из первых принципов» и приближенных аналитических подходов. Для упрощения численных кодов была поставлена задача разработки метода получения универсальных приближенных решений уравнения Бибермана-Холстейна для нестационарного переноса резонансного излучения в плазме при произвольном механизме уширения спектральной линии. Эта задача переросла в более общую задачу описания явлений переноса с доминирующей ролью длиннопробежных переносчиков. Такой перенос в литературе принято называть нелокальным или супердиффузионным, а такие

переносчики получили имя «полетов Леви». Для создания эталонных решений была поставлена задача получения точных аналитических решений стационарного переноса излучения в резонансных линиях в сильно неоднородном плазменном слое. В третьей задаче диссертанту было предложено развивать спектроскопическую диагностику горячей плазмы в приложении к токамакам-реакторам, где достижение высоких температур требует разработки новых методов расчета точности такой диагностики. Важную роль здесь играет учет спектральных характеристик плазмы и технических новшеств в проекте «многоцветной» томсоновской диагностики центральной плазмы в токамаке ИТЭР.

Научная новизна положений, выводов и рекомендаций.

Анализ диссертации показал, что для решения поставленных задач автору потребовалось разработать новые методы, с их помощью получить новые результаты и опубликовать их в ведущих российских и международных рецензируемых журналах, а также доложить на различных российских и международных научных конференциях по физике плазмы. Остановимся подробнее на основных научных результатах с акцентом на их научную новизну.

В главе 1 разработан новый метод, позволяющий получать приближенные автомодельные решения широкого класса уравнений нестационарного нелокального (супердиффузионного) переноса. Сюда относится перенос линейчатого излучения в плазме и газах для произвольного механизма уширения спектральной линии, при котором перенос является нелокальным. Этому классу задач переноса принадлежат такие интегро-дифференциальные уравнения переноса (интегральные по пространству и дифференциальные по времени), в которых интегральный оператор не сводится к дифференциальному, что и создает значительные вычислительные трудности. В итоге в работе построен алгоритм получения автомодельного решения, позволяющего – в силу автомодельности, сокращающей число независимых переменных для искомой функции – существенно снизить объем необходимых численных расчетов. Эффективность развитого метода продемонстрирована для различных задач нелокального переноса возмущения в однородной среде: это включает нестационарный перенос

линейчатого излучения в модели Бибермана-Холстейна для различных контуров спектральной линии и нестационарный одномерный перенос для модельного ядра интегрального оператора при его произвольном степенном спаде. Рассмотренных примеров вполне достаточно для претензии автора на создание нового метода в теории нелокального переноса.

В главе 2 развит новый метод получения аналитических автомодельных решений задачи *стационарного* переноса излучения в резонансных спектральных линиях в модели Бибермана-Холстейна в *сильно неоднородном* плазменном слое (курсивом отмечены свойства, отличающие эту главу от первой). Для таких решений естественно ожидать ограничений применимости, в данном случае ограничения имеют вид определенной связи пространственных профилей основных задаваемых характеристик в уравнении переноса – фоновой плотности (невозбужденных) атомов, характерной спектральной ширины линии и функции источника возбуждения атомов нерадиационными механизмами. Эти ограничения достаточно жесткие, но они охватывают достаточно широкий диапазон параметров плазмы. Это видно, в частности, из приведенного примера сравнения полученного точного решения с известным приближением «прострельного выхода» для переноса в линии лайман-альфа в сильно неоднородном слое водородной пристеночной плазмы. Можно сказать, что автор создал инструмент для контроля точности численных кодов и приближенных подходов путем сравнения их с его точными аналитическими решениями в частных, точно решаемых случаях.

В главе 3 разработан новый метод расчета точности диагностики параметров плазмы (температуры и плотности электронов) в токамаках-реакторах по спектрам неколлективного рассеяния зондирующего лазерного излучения (т.н. томсоновская диагностика). Эта спектроскопическая диагностика широко используется в исследованиях плазмы, особенностью проведенной в диссертации работы является подробный анализ влияния эффектов, связанных со спецификой спектров рассеяния лазерного излучения горячей плазмы и с возможной термодинамической неравновесностью электронов (т.е. отклонением функции

распределения электронов по скоростям от максвелловской). Развитый метод основан на решении обратной задачи восстановления параметров плазмы с учетом источников ошибок от самого процесса измерения и от критерия оптимизации, который используется для минимизации отклонения расчетного спектра от измеренного. Созданный расчетно-теоретический подход применен для решения практической задачи – расчета точности «многоцветной» (т.е. с использованием лазеров на различных длинах волн) томсоновской диагностики центральной плазмы в ИТЭР.

В этой же главе кратко очерчены контуры предложенной новой спектроскопической диагностики параметров функции распределения электронов по скоростям. Эта диагностика предполагает совместный анализ спектра томсоновского рассеяния зондирующего лазерного излучения и спектра собственного электронного циклотронного излучения плазмы на немалых гармониках этого излучения (низкие гармоники, как известно, обычно используются для диагностики «тепловой», термодинамически равновесной части функции распределения).

Таким образом, научная новизна положений, выводов и рекомендаций не вызывает сомнений.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы

Во-первых, автор работает на поле хорошо разработанных теоретических основ. Область применимости уравнения Бибермана-Холстейна хорошо известна (полное перераспределение по частоте в акте поглощения-переизлучения фотона), справедливость такого подхода показана на большом массиве экспериментальных данных. Рассеяние света свободными электронами – базовый процесс в электродинамике, известный с высокой точностью. Во-вторых, при разработке новых методов в теории нелокального переноса (главы 1 и 2) автор доказывает их применимость путем подробного сравнения своих результатов, полученных различными способами, а также сравнением с ранее известными результатами. Для этого, в частности, проводятся и прямые численные расчеты задачи переноса (в главе 1). В главе 3 основные выводы основаны на результатах обширных

численных расчетов, использующих разработанный автором метод оценки точности томсоновской диагностики немаксвелловской плазмы в токамаках-реакторах.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

К уже сказанному выше о практической важности автомодельных решений для сокращения объема необходимого численного моделирования при решении уравнений нелокального переноса добавим, что развитый метод получения приближенных автомодельных решений широко класса уравнений нестационарного переноса может выйти далеко за пределы физики плазмы. Явления такого рода, ассоциируемые в литературе с полетами Леви, охватывают широкую область науки, что отражено в обзорах литературы во Введении в диссертации и в опубликованных диссертантом журнальных статьях. Универсальность разработанного подхода является, на наш взгляд, существенным достоинством результатов главы 1.

Результаты главы 2 явно мотивированы практическими задачами – созданием эталонных решений для проверки точности численных кодов и приближенных аналитических моделей для переноса линейчатого излучения в периферийной плазме, в частности, в установках магнитного удержания плазмы.

Практическую значимость результатов главы 3 достаточно охарактеризовать тем, что разработанный метод и расчетные программы используются при разработке и оптимизации инженерного проекта томсоновской диагностики центральной плазмы в токамаке ИТЭР, а доказательство преимуществ «многоцветной» версии этой диагностики в ИТЭР отражено в публикации разработчиков в ведущем мировом журнале по термоядерным исследованиям.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах – статьях в рецензируемых международных научных журналах и тезисах международных конференций. В том числе, 7 работ входят в рекомендуемый перечень ВАК. Результаты приведенных исследований обсуждались соискателем на конференциях и научных семинарах в России и за рубежом. В опубликованных

работах достаточно полно отражены основные результаты и положения диссертации.

Замечания по диссертационной работе

1. Главы 1 и 2 основаны на использовании модели Бибермана-Холстейна переноса резонансного излучения. Было бы желательно более подробно обсудить условия применимости этой модели и сделанных в ней предположений, в частности, предположения о полном перераспределении фотона по частоте.
2. В главе 2 в разделе 2.2.1 приведены параметры плазмы, использованные в модельной задаче. Требуется пояснения достаточно большое количество нейтральных атомов, присутствующих, как видно из рис. 2.3 и 2.4(a), в довольно горячей (с температурой в десятки эВ) плазме.
3. В главе 3 следовало бы при сравнении критериев минимизации отклонения расчетного спектра от измеренного (в данном случае, смоделированного гипотетического спектра для пока не существующей установки) подробнее пояснить задачу возможной оптимизации выбора самого критерия оптимизации.
4. Замечания по оформлению:
 - в тексте отсутствует ссылка на рис. 1.2;
 - стр. 20, вторая строка раздела 1.1.2 – должно быть «отличаЕтся» вместо «отличаЮтся»;

Сделанные выше замечания не снижают научной значимости диссертационной работы и не влияют на общую положительную ее оценку.

С учетом сказанного выше можно заключить, что диссертационная работа Сдвиженского Петра Александровича «Разработка методов решения задач нелокального переноса излучения и спектроскопической диагностики плазмы» является выполненным на достаточно высоком уровне завершенным научным исследованием, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №

842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – “Физика плазмы”.

Главный научный сотрудник МФТИ, доктор физ.-мат. наук, профессор

Астапенко В.А.

Наименование организации – основного места работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ)

Официальный сайт организации: www.mipt.ru

Структурное подразделение: кафедра радиоэлектроники и прикладной информатики МФТИ

Должность: главный научный сотрудник

Адрес электронной почты: astval@mail.ru

Телефон: 8-962-993-89-04

Адрес: 141700, г. Долгопрудный, Московской обл., Институтский пер, 9

Подпись и сведения заверяю.

Ученый секретарь МФТИ

к.ф.-м.н.



Скалько Юрий Иванович