

Заключение

диссертационного совета Д 520.009.02 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по диссертации Сдвиженского П.А. «**Разработка методов решения задач нелокального переноса излучения и спектроскопической диагностики плазмы**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Диссертационный совет на основании выполненных соискателем исследований отмечает, что:

1) Разработаны новые методы:

- метод получения приближенного автомодельного решения для нестационарного нелокального переноса резонансного излучения в однородной плазме для произвольного механизма уширения линии излучения, при котором перенос является нелокальным (супердиффузионным); метод обобщен на широкий класс процессов переноса возбуждения с доминирующей ролью полетов Леви, когда функция распределения смещения переносчиков по длине их свободного пробега имеет медленный, степенной спад с ростом расстояния;
- метод получения точных аналитических решений задач стационарного переноса резонансного излучения в сильно неоднородном плазменном слое;
- метод расчета погрешности измерения средней энергии и концентрации электронов немаксвелловской плазмы в токамаках-реакторах по томсоновскому рассеянию, позволяющий одновременно учесть следующие факторы: широту и асимметрию спектра рассеянного излучения в горячей плазме, типичные отличия функции распределения электронов по скоростям от максвелловской; использование нескольких длин волн при лазерном зондировании, возможные источники ошибок во всей измерительной системе.

2) С помощью развитых методов получены:

- приближенное автомодельное решение для функции Грина уравнения Бибермана-Холстейна для произвольного контура линии излучения;
- приближенное автомодельное решение для функции Грина уравнения переноса возбуждения однородной среды с доминирующей ролью полетов Леви;
- точные аналитические решения задач одномерного и трехмерного переноса резонансного излучения в сильно неоднородном плазменном слое для определенного типа подобия

пространственных профилей концентрации невозбужденных атомов, ширины спектральной линии и плотности мощности нерадиационного источника возбуждения атомов;

- расчета точности измерения параметров горячей немаксвелловской плазмы по томсоновскому рассеянию при использовании нескольких зондирующих длин волн в диапазоне параметров плазмы, характерном для токамаков-реакторов.

3) Исследованы

- точность полученных приближенных автомодельных решений нестационарного уравнения Бибермана-Холстейна путем их сравнения с существующими в литературе аналитическими решениями для доплеровского и лоренцевского контуров спектральной линии, а также с существующим общим решением в частных случаях контуров спектральной линии Фойгта и Хольцмарка;

- точность полученных приближенных автомодельных решений уравнения нестационарного нелокального переноса возбуждения среды полетами Леви путем сравнения с полученными соискателем точными решениями;

- область применимости точных аналитических решений уравнения переноса резонансного излучения в сильно неоднородном плазменном слое;

- возможности предложенного соискателем алгоритма новой комплексной диагностики основных параметров плазмы с немаксвелловской функцией распределения электронов по скоростям в токамаках-реакторах, объединяющего две диагностики — по спектру томсоновского рассеяния лазерного излучения и по спектру электронного циклотронного (ЭЦ) излучения в спектральном диапазоне, для которого плазма является оптически прозрачной.

4) Показано, что:

- все полученные приближенные автомодельные решения уравнения нестационарного нелокального переноса обладают высокой точностью в широкой области варьируемых параметров задачи (типов уширения линии, параметров функции распределения переносчиков возбуждения по длине их свободного пробега), координат и времени;

- точное аналитическое решение для плотности возбужденных атомов в неоднородном плазменном слое для профилей основных параметров этого слоя, характерных для пристеночной плазмы, позволяет найти точность известного приближения «прострельного» выхода;

- использование лазеров с разными длинами волн повышает точность томсоновской диагностики. Например, для плазмы с электронной температурой 40 кэВ использование лазера с длиной волны 1320 нм позволит в ИТЭР добиться повышения точности оценки эффективной энергии в 1,5 раза по сравнению с лазерами с меньшей длиной волны, обычно используемыми для измерения меньших температур;
- использование новой комплексной диагностики основных параметров плазмы с немаквелловской функцией распределения электронов по скоростям (ФРЭС) может повысить точность оценки энергии, связанной с перпендикулярной и параллельной магнитному полю компонентами импульса электронов в токамаках-реакторах (напр., в ~1,5 раза в центральной части плазмы в токамаке типа ДЕМО).

5) Теоретическая значимость исследования обоснована следующим:

– Впервые найдено приближенное автомодельное решение нестационарного уравнения Бибермана-Холстейна в однородной среде для произвольного контура линии излучения/поглощения и предложено его обобщение на широкий класс процессов переноса возмущения среды длиннопробежными переносчиками (полетами Леви) в однородной среде.

– Впервые получено аналитическое автомодельное решение задачи стационарного переноса излучения в резонансных линиях излучения/поглощения в сильно неоднородном плазменном слое для широкого класса профилей параметров плазмы.

– Предложен новый метод расчета точности томсоновской диагностики плазмы в токамаках-реакторах, позволяющий одновременно учесть широту и асимметрию спектра рассеянного лазерного излучения и типичные отличия ФРЭС от маквелловской.

6) Практическая значимость результатов выражена в следующем:

– полученные приближенные автомодельные решения позволяют значительно сократить объем необходимых численных расчетов при решении уравнений нестационарного нелокального переноса возмущения в однородной среде;

– обобщение нового метода получения приближенных автомодельных решений уравнения Бибермана-Холстейна на широкий класс явлений нелокального (супердиффузионного) переноса с доминирующей ролью полетов Леви открывает возможности приложения метода далеко за пределами физики плазмы;

– предложенный метод расчета точности томсоновской диагностики плазмы в токамаках-реакторах позволил показать преимущества «многоцветной» томсоновской

диагностики центральной части плазмы в токамаке ИТЭР; разработанный метод и программы используются при разработке проекта использования этой диагностики в токамаке ИТЭР;

– полученные аналитические решения задачи переноса излучения в резонансных линиях в сильно неоднородном плазменном слое можно использовать для тестирования численных транспортных кодов (например, известного кода EIRENE) и аналитических приближений для описания переноса линейчатого излучения в периферийной области плазмы в лабораторных установках.

7) Достоверность результатов обусловлена детальностью проведенного исследования и сравнением результатов, полученных различными способами. Так, приближенные автомодельные решения, полученные в главах 1 и 2, проверены сравнением с точными решениями, имеющимися в литературе или полученными в работе. Метод оценки погрешности томсоновской диагностики немаксвелловской плазмы, развитый в главе 3, проанализирован путем многих численных расчетов для различных наборов входных параметров.

8) Личный вклад. Постановка задач и интерпретация полученных результатов осуществлялись автором лично или при его непосредственном участии. Все аналитические и численные расчеты проделаны автором лично, кроме части расчетов раздела 3.3, касающихся диагностики ФРЭС по спектру ЭЦ излучения.

Соискатель участвовал в подготовке материалов к опубликованию и представлял результаты научной работы на научных семинарах, школах и конференциях.

* * *

Диссертационный совет пришел к выводу, что работа Сдвиженского П.А. «Разработка методов решения задач нелокального переноса излучения и спектроскопической диагностики плазмы», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09. 2013 г. № 842.

На заседании 19 апреля 2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Сдвиженскому Петру Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности диссертации 01.04.08 – «Физика плазмы», участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение ученой степени – 18,

против присуждения ученой степени – 0,

недействительных бюллетеней – 0.

Протокол счетной комиссии утвержден открытым голосованием единогласно.