

На правах рукописи



ГЕРАСИМЕНКО Александр Борисович

**КИНЕТИКА ПРИМЕСИ ИОНОВ В
НЕЙТРАЛЬНОМ ГАЗЕ ПОСЛЕ ВКЛЮЧЕНИЯ
ПОСТОЯННОГО ИЛИ ПЕРЕМЕННОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ РАЗЛИЧНОЙ
ВЕЛИЧИНЫ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в *Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН.*

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Кузнецов Виктор Иосифович*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник (ООО “Код-
дан технолоджис”, руководитель отдела
исследований),
Горбачев Юрий Евгеньевич;
кандидат физико-математических наук,
доцент (СПбГПУ, институт физики,
нано-технологий и телекоммуникаций,
кафедра физики плазмы),
Кавеева Елизавета Геннадьевна*

Ведущая организация: *Балтийский государственный техниче-
ский университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф.
Устинова (Санкт-Петербург)*

Защита диссертации состоится «___» _____ 2016 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.30 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д.28, математико-механический факультет, ауд.405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9 и на сайте <http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/677.html>

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук, доцент

Кустова Е.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Вопрос о поведении примеси заряженных частиц в нейтральном газе при наличии полей возник достаточно давно. Как отмечают в своей книге Мак Даниель и Мэзон (1988), первые надежные экспериментальные данные были получены в 50-х годах прошлого века. В это же время появились первые серьезные теоретические работы, в которых изучалось движение примеси ионов в газе при наличии электрического поля, выполненные Сена (1946), Ванье (1953) и Перелем (1957). Тогда же были сформированы основные теоретические подходы к решению этого класса задач: с помощью гидродинамического описания, с помощью решения кинетического уравнения Больцмана и прямое численное моделирование.

Физика низкотемпературной плазмы как отдельное направление сформировалась совсем недавно (Чен и Чанг (2002)). Это связано с большими сложностями при изучении ион-нейтральных систем, связанными с необходимостью правильного учета столкновений частиц с фоновым газом и взаимного влияния частиц. Большинство имеющейся информации является либо экспериментальными данными, либо результатом компьютерного моделирования. Таким образом, теоретическое описание таких систем на основе кинетического уравнения развито недостаточно. Кинетическое описание необходимо, поскольку знание функции распределения частиц дает возможность вычислять все основные макропараметры системы: концентрацию частиц, токи и т.д. Описание процессов ионизации и вычисление констант химических реакций также требуют информации о высокоскоростных частицах, а как известно, так называемые «хвосты функции распределения» крайне сложно восстановить из макровеличин (плотность, ток), а это значит, что необходимо решать кинетическое уравнение. И если определенные результаты в изучении функции распределения электронов уже достигнуты (благодаря возможности применения упрощений, связанных с большой разностью масс частиц), то в области изучения функции распределения ионов еще многое предстоит сделать.

В диссертации изучено поведение малых примесей ионов в фоновом газе при наличии внешних полей. Примесь считается малой, если она не изменяет функцию распределения фонового газа и отсутствует взаимодействие между частицами примеси. Взаимодействия между частицами примеси и фоновым газом считаются упругими, то есть явления поляризации и ионизации не рассматри-

ваются.

Можно выделить несколько прикладных областей, для которых необходимо кинетическое описание систем с небольшой примесью ионов в нейтральном фоновом газе при наличии электрического поля. Первая – это эксперименты с дрейфовыми трубками и основанная на них масс-спектрометрия на базе подвижности ионов. В настоящий момент масс-спектрометры на основе ионной подвижности и дрейфовые трубки очень широко используются как в системах безопасности (для детектирования наличия тех или иных веществ), так и в медицинских исследованиях. Другими областями, где востребована информация о функции распределения, являются: плазменная обработка материалов, изучение поверхностей материалов путем бомбардировки их ионами, теоретическое описание ВЧ разрядов и разработка газовых детекторов излучения.

Для моделирования упомянутых выше устройств и явлений необходимо, по крайней мере, знание коэффициентов подвижности и диффузии, а в идеале – полной функции распределения ионов по скоростям. Если по вычислению коэффициентов переноса существует довольно много теоретических работ и данные приводятся для многих газов (работы Виланда, Уайта, Робсона), то о функции распределения информации значительно меньше. В настоящее время нет точного метода аналитического решения уравнения Больцмана. Метод прямого численного моделирования систем дает достоверные результаты только в области небольших скоростей. Это связано с тем, что объем вычислений в рассматриваемой проблеме является слишком большим даже для современных вычислительных машин. В этой связи представляется исключительно важным вопрос о расчете функции распределения ионов при наличии внешних полей на основе решения кинетического уравнения Больцмана.

Цели и задачи диссертационной работы: Целью диссертационной работы является исследование поведения малой примеси ионов при наличии электрического поля. Рассматривается пространственно однородный случай и упругие столкновения между частицами. Вычисления проводятся с помощью нестационарного моментного метода и его модификаций.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Рассмотрена эволюция функции распределения примеси ионов в фоновом газе после резкого включения постоянного электрического поля различной напряженности для нескольких моделей взаимодействий. Расчет про-

водился с помощью нестационарного моментного метода, основанного на разложении функции распределения по сферическим полиномам Эрмита около максвеллиана с температурой фонового газа.

2. Анализ и реализация возможных подходов к преодолению сложностей нестационарного моментного метода, а именно метода разложения по сферическим гармоникам и модифицированного моментного метода, заключающегося в разложении функции распределения около максвеллиана с температурой, отличной от температуры фонового газа и зависящей от времени.
3. С помощью нестационарного и модифицированного моментных методов решена задача об эволюции функции распределения примеси ионов в фоновом газе после резкого включения гармонического электрического поля разной амплитуды и частоты для нескольких моделей взаимодействия.

Научная новизна.

1. Продемонстрированы новые возможности нестационарного моментного метода. Получено решение задачи об эволюции функция распределения малой примеси ионов в собственном газе после резкого включения постоянного электрического поля. Вычислены функция распределения, ток и подвижность ионов для различных величин электрических полей и ряда моделей взаимодействия.
2. С помощью модифицированного моментного метода впервые рассчитана функция распределения и физические моменты для задачи об эволюции функции распределения малой примеси ионов в собственном газе после резкого включения переменного электрического поля.
3. Изучены границы применимости нестационарного моментного метода и предложены пути преодоления сложностей моментного метода: метод разложения по сферическим гармоникам и модифицированный моментный метод.

Теоретическая и практическая значимость. Создан пакет программ для расчета функция распределения, тока, энергии и подвижности малой примеси ионов в собственном газе при наличии постоянного или переменного электрического поля путем численного решения уравнения Больцмана. Результаты,

изложенные в диссертации, могут быть использованы при описании явлений и экспериментов, связанных с движением ионов в собственном газе при наличии электрических полей. В частности, результаты могут быть полезны при проектировании газовых детекторов излучения. Их работа основывается на детектировании ионного тока, созданного электрическим полем, наложенным на ионизируемый излучением благородный газ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Решена задача о движении ионов в собственном газе при умеренном и сильном постоянном электрическом поле для случая упругих столкновений частиц с помощью нестационарного моментного метода. Впервые вычислена функция распределения и подвижность ионов в зависимости от величины поля в широком диапазоне скоростей.
2. Предложено два пути преодоления сложностей нестационарного моментного метода: использование метода разложения по сферическим гармоникам и модифицированный моментный метод.
3. Решена задача о движении ионов в собственном газе в переменном электрическом поле для нескольких моделей взаимодействия с помощью модифицированного моментного метода. Получены временные зависимости функции распределения, ионного тока и энергии при различных частотах и амплитудах поля.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 7 российских и международных конференциях: «Всероссийский семинар по аэрогидродинамике, посвященный 90-летию со дня рождения С.В. Валландера» 5 - 7 февраля 2008г., Санкт-Петербург, Россия; «V Поляховские чтения», 3 - 6 февраля 2009г., Санкт-Петербург, Россия; «Физика.СПб», 27 - 28 октября 2010г., Санкт-Петербург, Россия; «VI Поляховские чтения», 31 января - 3 февраля 2012г., Санкт-Петербург, Россия; X международная научная конференция «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей», 25 - 28 июня 2012г., Санкт-Петербург, Россия; «Современные проблемы динамики разреженных газов», 26 - 29 июля 2013г., Новосибирск, Россия; «VII Поляховские чтения», 2 - 6 февраля 2015г., Санкт-Петербург, Россия.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 11 печатных работах, из них 3 статьи в реферируемом журнале, входящем в перечень ВАК, 1 статья в реферируемом журнале не входящем в список ВАК, 2 статьи в сборниках трудов конференций и 5 тезисов докладов.

Личный вклад автора. В первой главе постановка задачи и разработка новых методов расчета матричных элементов интеграла столкновений на основе рекуррентных соотношений принадлежит А.Я.Эндеру и И.А.Эндер. Автору разработал алгоритм, создал пакет программ и проводил расчеты для моделей с постоянной длиной свободного пробега для случая постоянного электрического поля и проводил анализ полученных результатов и последующее сопоставление с известными экспериментальными данными (для модели резонансной перезарядки с постоянной частотой столкновений результаты были получены А.Я.Эндером и И.А.Эндер). Во второй главе А.Я.Эндеру и И.А.Эндер принадлежит идея перехода к методу разложения по сферическим гармоникам и модифицированному моментному методу. Герасименко А.Б. проводил исследования по применимости метода разложения по сферическим гармоникам и принимал участие в разработке модифицированного моментного метода и исследовании его сходимости. В третьей части работы, посвященной переменному электрическому полю Герасименко А.Б. принимал непосредственное участие во всех этапах работы от постановки задачи и разработки программ до анализа полученных результатов для четырех рассматриваемых моделей взаимодействий. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами. Использованные при проведении расчетов массивы матричных элементов получены с помощью программ созданных А.Я.Эндером и И.А.Эндер.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 123 страницах и состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения, библиографического указателя. Работа иллюстрирована 52 рисунками и 1-й таблицей. Библиография включает 86 наименований цитируемой литературы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, аргументирована новизна и обозначены цели работы. Обоснована значимость ре-

зультатов и сформулированы положения, выносимые на защиту.

Обзор литературы содержит анализ теоретических исследований поведения ионов в низкотемпературной плазме. Проанализированы преимущества и недостатки известных подходов к решению кинетических задач физики ионов. Из рассмотренных литературных источников следует, что основное внимание исследователей на данном этапе сосредоточено на непосредственном решении уравнения Больцмана для ионов при наличии постоянных или переменных электрических полей. Надо отметить, что в то время как для случая постоянных электрических полей существует довольно много работ, для переменных полей число публикаций гораздо меньше. Основной упор при получении данных делается на теоретическое исследование. Это связано с тем, что постановка эксперимента является довольно дорогостоящей и нетривиальной задачей, в то время как теоретические расчеты уже позволяют получить довольно точные результаты. Тем не менее многие авторы отмечают значительное отставание разработанных методов численного решения уравнения Больцмана от текущих потребностей в прикладных областях.

Как отмечают все авторы, основной трудностью при решении кинетического уравнения Больцмана является расчет интеграла столкновений. Обсуждению этой проблемы посвящена заключительная часть обзора литературы. В ней описываются последние результаты полученные в работах А.Я.Эндера и И.А.Эндер. Главным достижением этих работ является нахождение рекуррентных соотношений для матричных элементов интеграла столкновений уравнения Больцмана (коэффициентов разложения интеграла столкновений по ортогональным полиномам). Это позволяет вычислять любое число матричных элементов, необходимых для применения нестационарного моментного метода решения уравнения Больцмана.

Из обзора литературы следует, что в настоящее время велика потребность в построении численных методов решения уравнения Больцмана, что связано с необходимостью расчета функции распределения и коэффициентов переноса для различных задач и приложений. В то же время новые достижения в расчете интеграла столкновений позволяют развить моментный метод и таким образом получить новые результаты для ряда моделей взаимодействия.

В первой главе рассмотрена пространственно однородная задача о временной эволюции функции распределения малой примеси ионов в фоновом га-

зе после резкого включения постоянного электрического поля. Столкновения считаются упругими, а эффект неупругих процессов считаем пренебрежимо малым. Это возможно, например, для аргона при величине приведенного электрического поля порядка $10 - 10^3 \text{Тд}$. Функцию распределения фонового газа считаем максвелловской. Плотность ионов считаем малой, и предполагается, что функция распределения фонового газа не меняется. Рассматривается случай, когда ионы движутся в собственном газе, т.е. массы иона и атома равны, а начальная функция распределения ионов максвелловская.

Для удобства представления и унификации результатов рассмотрение ведется в безразмерных переменных. За единицу скорости принята тепловая скорость $v_0 = \sqrt{2kT_a/m}$, соответствующая температуре атомов, за единицу времени - среднее время между столкновениями τ . Безразмерное поле задается параметром ϵ , являющимся отношением энергии, полученной ионом от поля на длине свободного пробега λ , к энергии атомов:

$$\epsilon = \frac{eE\tau}{\sqrt{2kTm}} = \frac{eE\lambda}{2kT}$$

Согласно классификации, предложенной в монографии МакДаниеля и Мэзона: $\epsilon < 0.1$ – это слабые поля, $0.1 < \epsilon < 1$ – умеренные поля, $\epsilon > 1$ – сильные поля.

Эволюция функции распределения ионов по скоростям $f(\mathbf{c}, t)$ описывается с помощью нестационарного безразмерного уравнения Больцмана

$$\frac{\partial f(\mathbf{c}, t)}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial f(\mathbf{c}, t)}{\partial \mathbf{c}} = I(f(\mathbf{c}, t), M(c)), \quad M(c) = (1/\pi)^{3/2} \exp(-c^2). \quad (1)$$

Для удобства сравнения результаты приводятся не только в описанной выше стандартной нормировке, но и в нестандартной нормировке, при которой единицы измерения напряженности поля и времени выбираются так, чтобы при решении нестационарной задачи на больших временах подвижность ионов (отношение скорости дрейфа к величине поля) в случае слабого поля оказывалась единицей для всех рассматриваемых моделей. Используемые модели взаимодействия можно разделить на две группы.

Модели с постоянной длиной свободного пробега ($\lambda = \text{const}$):

HS-модель (модель твердых шаров) – рассеяние изотропно, полное сечение не зависит от скорости;

SEHS-модель (резонансная перезарядка с постоянной длиной свободного про-

бега) – угловая часть сечения - резонансная перезарядка, сечение не зависит от скорости.

Модели с постоянным временем между столкновениями ($\tau = const$):

СЕМ-модель (Charge Exchange Maxwellian) – угловая часть сечения - резонансная перезарядка, т.е. рассеяние на 180° , полное сечение рассеяния обратно пропорционально относительной скорости;

ММ-модель (Максвелловские молекулы) – угловая часть сечения считается известной функцией, полное сечение обратно пропорционально относительной скорости; РММ-модель (Псевдомаксвелловские молекулы) – рассеяние изотропно, полное сечение рассеяния обратно пропорционально относительной скорости (модель Крука-Ву).

Численное исследование проведено путем решения уравнения (1) нестационарным моментным методом. Важной особенностью метода является то, что стационарная функция распределения ищется как результат решения нестационарной задачи на больших временах. Моментный метод заключается в разложении функции распределения по произведению сферических гармоник на полиномы Сонина и последующем преобразовании уравнения Больцмана к системе дифференциальных уравнений. Это достигается путем подстановки разложения в уравнение и последующим интегрированием по скоростям с соответствующим полиномом. Отметим, что при наличии электрического поля, задача является осесимметричной по скоростям, что позволяет далее использовать разложение вида

$$f(\mathbf{c}, t) = M(c) \sum_{r=0}^R \sum_{l=0}^N C_{r,l}(t) H_{r,l}(\mathbf{c}), \quad H_{r,l}(\mathbf{c}) = P_l(\cos \Theta) c^l S_{l+1/2}^r(c^2) \quad (2)$$

где $S_{l+1/2}^r(c^2)$ - полиномы Сонина, а $C_{r,l}(t)$ - моменты функции распределения. Условие сходимости разложения (2):

$$\int_0^{\infty} f^2 \exp(c^2) d^3c < \infty, \quad (3)$$

С помощью (2) уравнение (1) сводится к системе уравнений для коэффици-

циентов разложения $C_{r,l}$ – моментных уравнений:

$$\frac{\partial C_{r,l}}{\partial t} + \epsilon \left(\frac{2}{2l+3} r(l+1) C_{r-1,l+1} - \frac{2l}{2l-1} C_{r,l-1} \right) = \sum_{r_1} \Lambda_{r,r_1,l} C_{r_1,l}. \quad (4)$$

$\Lambda_{r,r_1,l}$ -линейные матричные элементы интеграла столкновений:

$$\Lambda_{r,r_1,l} = \int H_{r,l} I(M(c) H_{r_1,l}(c), M(c)) / g_{r,l} d\mathbf{c}, \quad g_{r,l} = \frac{(2r+2l+1)!!}{(2r)!! 2^l (2l+1)}. \quad (5)$$

Расчет матричных элементов осуществляется с помощью рекуррентных соотношений полученных А.Я.Эндером и И.А.Эндер.

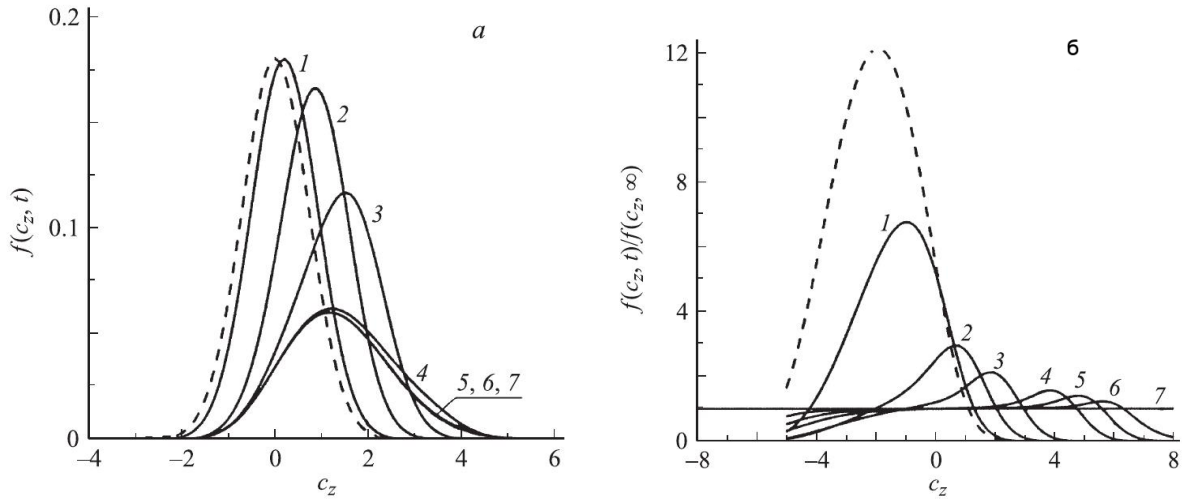


Рис. 1. Временная эволюция функции распределения. Модель твердых шаров. $\epsilon = 2$. 1 - $t = 0.1$, 2 - 0.5, 3 - 1, 4 - 2, 5 - 2.5, 6 - 3, 7 - 3.5.

Отладка реализованного численного метода проводилась с помощью известного аналитического решения для случая СЕМ-модели. Было продемонстрировано очень хорошее совпадение численного и аналитического результатов. Численное исследование позволило изучить функцию распределения и подвижность для нескольких моделей взаимодействия. Для всех моделей взаимодействия установившаяся функция распределения сильно отличалась от максвелловской. Так, например на рисунке 1а приведена функция распределения для модели твердых шаров. Также исследование показало, что в области отрицательных скоростей установление стационарного решения происходит гораздо быстрее для моделей с постоянной частотой столкновений. Представленная на рис.1б зависимость отношения функции распределения к стационарному значению демонстрирует характерный для всех моделей резкий скачок значения

функции распределения практически до нуля, который со временем сдвигается в область все больших значений скорости. По ходу вычисления функции распределения в моментном методе вычисляются макропараметры, например подвижность.

Результаты расчета стационарной подвижности и известные экспериментальные результаты для аргона приведены на рис.2. Как видно из рисунка, результаты расчета для моделей с изотропным рассеянием (HS) и резонансной перезарядкой (CEHS) заметно отличаются. Тем не менее из рисунка хорошо видно, что полученные результаты для CEHS модели хорошо согласуются с экспериментом и количественное различие не превышает 20%.

Видно также, что экспериментальные данные попадают в коридор между расчетными. Это говорит о том, что возможно улучшить результат численного расчета, используя модель сечения, являющуюся комбинацией изотропного рассеяния и рассеяния на 180 градусов.

Основным результатом первой главы является то, что нестационарный моментный метод, при использовании большого числа матричных элементов ($R, N \sim 128$) позволяет строить решения поставленной задачи на больших временах, вплоть до выхода на стационарное состояние. Проведенные расчеты позволяют с хорошей точностью описывать имеющиеся экспериментальные результаты.

Во второй главе анализируются ограничения, свойственные нестационарному моментному методу, и предлагаются пути их преодоления. При решении задач моментным методом было выявлено две основные проблемы: нарушение условия сходимости (3) и сильный рост значений коэффициентов разложения $C_{r,l}$ по полиномам Сонина с ростом поля. Первая проблема преодолевается путем использования разложения по сферическим гармоникам вместо разложения по полиномам Сонина. Второй, соответственно, путем использования модифицированного моментного метода.

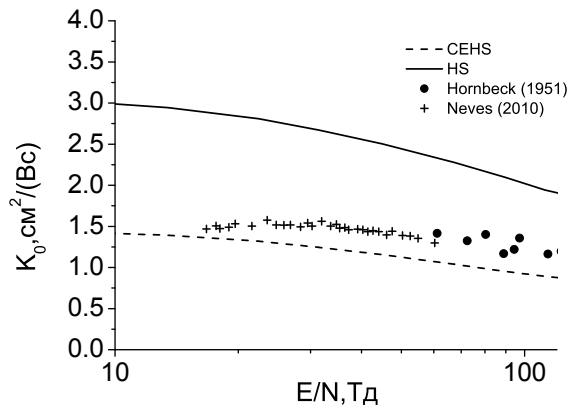


Рис. 2. Сравнение результатов с экспериментом для моделей с $\lambda = const$ и изотропным рассеянием (HS) и резонансной перезарядкой (CEHS).

Оба подхода были реализованы. При разложении функции распределения по сферическим вещественным гармоникам (без разложения по полиномам Со-нина) функция распределения представляется в виде

$$f(\mathbf{c}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \sum_{i=0}^1 f_{l,m}^i(c) Y_{l,m}^i(\Theta, \varphi), \quad (6)$$

$$Y_{l,m}^0(\Theta, \varphi) = P_m^l(\cos \Theta) \cos(m\varphi), \quad Y_{l,m}^1(\Theta, \varphi) = P_m^l(\cos \Theta) \sin(m\varphi), \quad m = 0, \dots, l.$$

Тогда коэффициенты разложения определяются как скалярное произведение

$$f_{l,m}^i = \int f(c) Y_{l,m}^i(\theta, \varphi) d\mathbf{c}$$

Уравнение Больцмана (1) в осесимметричном случае ($i = 0, m = 0$) переходит в систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_l}{\partial t} + \epsilon \left[\left(\frac{\partial f_{l+1}}{\partial c} + (l+2) \frac{f_{l+1}}{c} \right) \frac{l+1}{2l+3} \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial f_{l-1}}{\partial c} - (l-1) \frac{f_{l-1}}{c} \right) \frac{l}{2l-1} \right] = I_l(f_l, M), \end{aligned} \quad (7)$$

где $I_l(f_l, M)$ – коэффициенты разложения интеграла столкновений по сферическим гармоникам.

Решение системы (7) было реализовано с использованием численной схемы Лакса-Вендроффа. Расчеты были выполнены для случаев СЕМ-модели и модели твердых шаров. При этом наблюдалось полное совпадение численных результатов с результатами, полученными нестационарным моментным методом. Вычисления удалось провести вплоть до сильных полей ($\epsilon = 1$), однако, с ростом поля в области малых скоростей возникают нефизические осцилляции функции распределения, преодолеть которые не удалось.

Продвинуться в область сильных полей позволило использование модифицированного моментного метода. Основным его отличием от стандартного моментного метода является то, что разложение функции распределения производится около базисного максвеллиана с температурой не только, отличной от температуры фонового газа, но и меняющейся со временем. Такое изменение температуры позволяет добиться уменьшения величины моментов, что, в свою

очередь, предотвращает возникновение ошибок вычислений и расходимость решения. При этом нужно дополнительно произвести пересчет матричных элементов для перехода к новому базису.

Таким образом во второй главе описаны сложности нестационарного моментного метода, исследованы их причины и описаны методы, позволяющие их преодолеть.

В третьей главе рассмотрена задача об эволюции функции распределения малой примеси ионов после резкого включения гармонического электрического поля $\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot \cos(\omega t)$ с произвольной частотой ω и амплитудой ϵ_0 . Для ее решения были использованы как стандартный, так и модифицированный моментные методы. Получено и проанализировано аналитическое решение задачи для случая СЕМ модели. Решение состоит из двух частей - периодической и аperiодической. Периодическая часть решения полностью совпала с результатом, полученным ранее в работе Шугавары (1992) методом суперпозиции функций распределения ионных групп.

Проведено подробное исследование задачи для малого значения параметра $\alpha = \epsilon_0/\omega$. Изучены функция распределения, ток j , продольная W_l , поперечная W_t и полная W энергии. Для представления результатов оказалось более удоб-

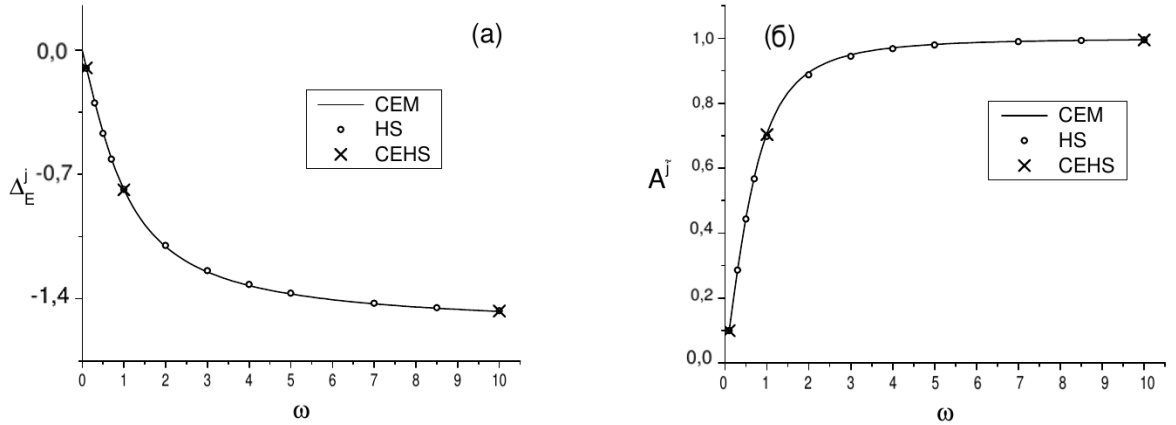


Рис. 3. Зависимости (а)– сдвига фаз Δ_E^j тока относительно поля и (б)–амплитуды A^j приведенного тока от частоты. $\alpha < 1$.

ным использовать приведенные моменты:

$$\tilde{j} = \frac{j}{\alpha}, \quad w_t = \frac{W_t - 1}{\alpha^2}, \quad w_l = \frac{W_l - 0.5}{\alpha^2}, \quad w = w_t + w_l, \quad (8)$$

где w_t , w_l – поправки к поперечной и продольной энергиям, а w – приведенная поправка к полной энергии.

На рис.3 представлены результаты расчета приведенного тока для СЕМ и $\lambda = const$ моделей в нестандартной нормировке. Расчеты показали, и это хорошо видно из рисунков, что при малых α зависимости приведенного тока оказываются универсальными и совпадают для всех рассмотренных моделей при любых ω .

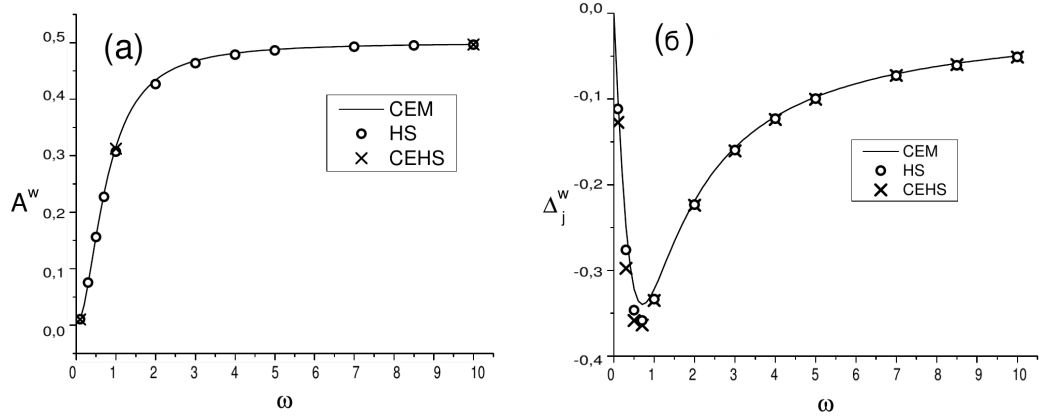


Рис. 4. Зависимость амплитуды (а) и сдвига фаз приведенной поправки к энергии относительно тока (б) от частоты поля. Малые α .

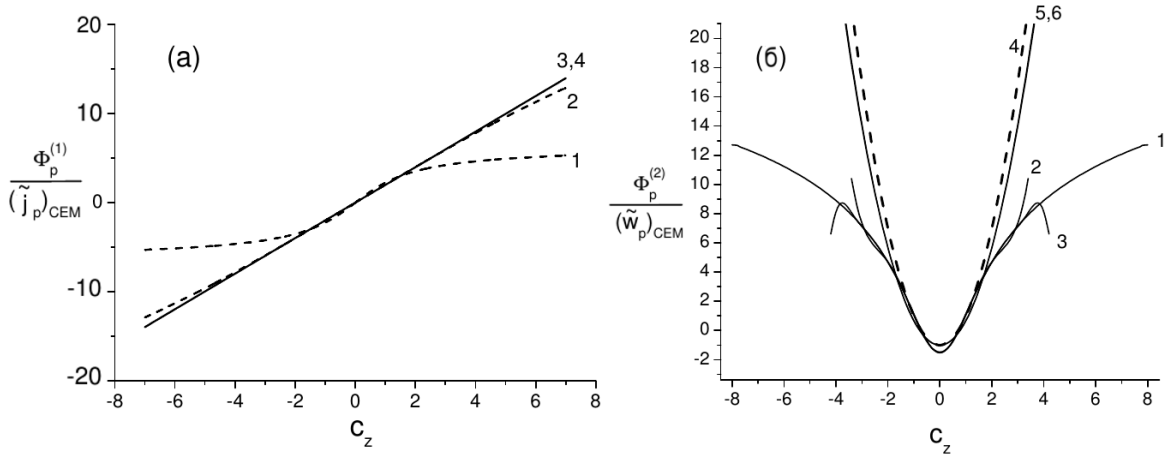


Рис. 5. Приведенные поправки первого (а) и второго порядка (б) к функции распределения. Модель твердых шаров. (а): кривая 1 – $\omega = 0.3$, 2 – $\omega = 10$, 3 – $\omega = 50$, 4 – СЕМ-модель; (б): кривая 1 – $\omega = 0.3$, $N_0 = 64$, 2 – $\omega = 0.3$, $N_0 = 4$, 3 – $\omega = 0.3$, $N_0 = 8$, 5 – $\omega = 50$, $N_0 = 1$, 6 – $\omega = 50$, $N_0 = 64$, 4 – СЕМ-модель.

На рис.4 представлены зависимости амплитуды и сдвига фаз относительно поля и тока приведенных поправок к энергии. Видно, что они оказываются универсальными при $\omega > 1$. Исследовано поведение поперечной составляющей энергии, которая отсутствует в случае СЕМ модели. Оказалось, что амплитуда колебаний приведенной поправки поперечной энергии уменьшается с ростом частоты, при этом её среднее значение растет и выходит на насыщение.

Было проведено разложение функции распределения по малому параметру α . На рис.5 для HS модели показаны поправки первого и второго порядка отнесенные к приведенному току и поправке к энергии для SEM модели. Видно, что поправка первого порядка совпадает для всех моделей при больших ω , а поправка второго порядка близка к SEM модельной. При этом для проведения расчетов в области малых частот потребовалось использовать разложение до высоких степеней полиномов Сонина N_0 .

Проведенное исследование позволило предложить классификацию задач с переменным полем не по величине амплитуды электрического поля, а по параметру $\alpha = \epsilon_0/\omega$. Слабые поля – $\alpha < 0.1$, умеренные поля – $0.1 < \alpha < 1$, сильные поля – $\alpha > 1$. Для случая умеренных и сильных полей был выполнен численный расчет задачи с помощью модифицированного моментного метода. Надо отметить очень хорошее совпадение результатов расчета с аналитическим решением для SEM модели.

На рис.6 представлена функция распределения в момент максимального значения ионного тока для нескольких моделей взаимодействия. Видно, что функция распределения сильно отличается от максвелловской и ее вид сильно зависит от угловой зависимости сечения рассеяния. В нашем случае для резонансной перезарядки имеются выраженные максимумы, в то время как в случае изотропного рассеяния их нет.

Расчет функции распределения позволил получить зависимости приведенного тока от времени. Они приведены на рис.7. Видно, что периодические кривые

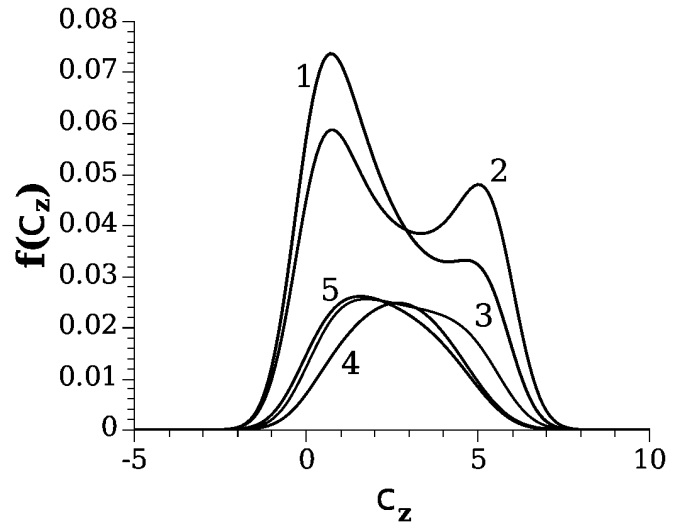


Рис. 6. Функция распределения на оси симметрии. Ионный ток максимален. $\epsilon = 6$, $\omega = 2$. Угловая часть сечения: резонансная перезарядка (CEHS(1), SEM(2)), изотропное рассеяние (HS(3), MM(4),PMM(5)).

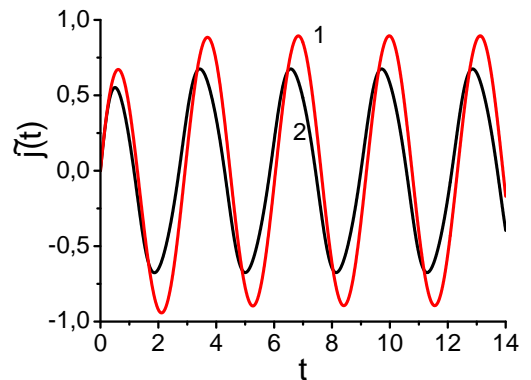


Рис. 7. Зависимость тока от времени для моделей (1)– $\lambda = const$ и (2)– $\tau = const$. $\epsilon_0 = 10$, $\omega = 2$

токов отдельной группы моделей $\lambda = const$ или $\tau = const$ совпадают, в то время как между кривыми токов разных групп есть заметное различие. Следовательно, зависимость тока от времени определяется полным сечением и не зависит от угловой части. Таким образом, использование модифицированного моментного метода позволило провести численное решение задачи о движении малой примеси в собственном газе при включении переменного электрического поля.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

1. Моментным методом решена задача о поведении малой примеси ионов в собственном атомном газе при наличии постоянного электрического поля для случая упругих столкновений. Вычислены функция распределения и подвижность ионов для моделей с $\lambda = const$, $\tau = const$ и разной угловой зависимостью сечения рассеяния (резонансная перезарядка, изотропное рассеяние).
2. Определены границы применимости нестационарного моментного метода. Предложены пути преодоления ограничений моментного метода: использование метода разложения по сферическим гармоникам и модифицированного моментного метода.
3. Разработан модифицированный моментный метод. Получены и проанализированы решения задачи об эволюции функции распределения примеси ионов после резкого включения переменного электрического поля.
4. Проведено сравнение результатов расчетов при постоянном поле с экспериментальными данными. Продемонстрировано хорошее совпадение результатов с экспериментом, особенно в случае СЕНС-модели (резонансная перезарядка, $\lambda = const$).

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. А.Я. Эндер, И.А. Эндер, А.Б. Герасименко. Кинетика ионов в нейтральном газе при резком включении электрического поля. Ч. II. Различные модели взаимодействия. // Журнал Технической Физики. 2010. Т. 80, №. 2. С. 18-28.

2. А.Я. Эндер, И.А. Эндер, А.Б. Герасименко. Эволюция распределения ионов по скоростям после резкого включения периодического электрического поля. СЕМ-модель. // Журнал Технической Физики. 2013. Т. 83, №. 7. С. 6-15.
3. А.Я. Эндер, И.А. Эндер, А.Б. Герасименко. Эволюция примеси ионов в переменном высокочастотном электрическом поле. // Журнал Технической Физики. 2015. Т. 85, №. 1. С. 15-25.

Другие публикации

1. Ender A. Y., Ender I. A., Gerasimenko A. B. Standard Moment Method in the Problems on Ion Kinetics in Neutral Gas // The Open Plasma Phys.J. 2009. Vol. 2. P. 24–62.
2. А.Я. Эндер, И.А. Эндер, А.Б.Герасименко Аналитическое решение задачи об эволюции функции распределения ионов после резкого включения периодического электрического поля. // Международная конференция по механике VI Поляховские чтения, СПб 31 января – 3 февраля 2012. Избранные труды. — Москва: Изд. И.В. Балабанов, 2012. — 278-284. P.
3. Герасименко А. Б., Эндер А. Я., Эндер И. А. Нестационарная функция распределения ионов в газе при включении периодического электрического поля. Различные модели взаимодействий. // Всероссийская конференция «Современные проблемы динамики разреженных газов». Новосибирск. 26-29 июля 2013. Новосибирск: Издательство Института теплофизики СО РАН, 2013. С. 75–77.