

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Карташевой Александры Александровны

«Колебательные свойства плазменно-пылевой системы в стратифицированном разряде»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа Карташевой А.А. посвящена вопросам теоретического и экспериментального характера, связанным с колебательными свойствами уединенной пылевой частицы, удерживаемой потенциальным полем стоячей страты.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая ценность работы, указан объект и метод исследования, отмечен личный вклад автора.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации. В обзоре приведено описание особенностей формирования функции распределения электронов в стратифицированном разряде низкого давления и рассмотрен кинетический подход для описания процесса зарядки пылевых частиц, как в приближении ограниченного орбитального движения, так и в случае слабоионизированной плазмы. Рассмотрены эффекты, связанные с взаимным влиянием пылевых частиц и плазмы тлеющего разряда. Отдельно рассмотрены вопросы, связанные с изучением колебательного движения пылинок. Также обсуждены работы по экспериментальным методам определения заряда пылевых частиц в различных типах разряда.

Во второй главе предложен теоретический метод расчета заряда уединенной пылевой частицы с учетом нелокальной кинетики электронов в стратифицированном разряде. Рассчитана нелокальная функция распределения электронов по энергии в стратифицированном разряде в неоне при низких давлениях газа. Проведено сравнение вычисленной функции распределения с максвелловской и проведено исследование влияния вида функции распределения на распределение концентрации электронов вдоль страты. Рассчитаны плотности электронного и ионного потоков на пылинку в зависимости от положения пылинки вдоль страты с учетом изменения ее потенциала. Рассчитано распределение потенциала и заряда пылинки вдоль страты для нелокальной и максвелловской функций распределения. Показано, к каким ошибкам в определении заряда может привести использование равновесной функции распределения.

В третьей главе описана экспериментальная установка, созданная, при участии соискателя, для исследования колебательных свойств плазменно-пылевой системы. Также в этой главе рассмотрен экспериментальный метод расчета заряда уединенной пылевой частицы в страте, предложенный соискателем. Основу метода оставило исследование затухающих колебаний уединенной пылевой частицы, обусловленных модуляцией разрядного тока импульсами с коротким фронтом. Релаксационные колебания пылинки в страте измерены в диапазоне давлений $p=0.06-0.38$ торр и на основе экспериментально определенного значений собственной частоты пылинки вычислен ее заряд.

В четвертой главе исследованы линейные вынужденные колебания уединенной пылевой частицы, обусловленные модуляцией разрядного тока с частотой 1-30 Гц,

приведены результаты измерений характеристик вынужденных колебаний пылинки в зависимости от давления газа, для двух значений давления из исследуемого диапазона обнаружены резонансные максимумы на частоте, близкой к собственной частоте системы, и на частотах, кратных ей. Количественное описание вынужденных колебаний пылинки было проведено на основе модели гармонического осциллятора. Получены значения колебательных характеристик плазменно-пылевой системы: собственной частоты, резонансной частоты, коэффициента затухания и амплитуды в резонансе. Установлено, что полученные резонансы на субгармониках являются откликом плазменно-пылевой системы на каждую компоненту в разложении в ряд Фурье прямоугольного импульса. Двумя независимыми методами получено значение собственной частоты плазменно-пылевой системы. Получено значение добротности плазменно-пылевой системы, имеющей порядок нескольких единиц, что говорит о большой степени диссипации системы.

В пятой главе приводятся результаты исследования вынужденных колебаний уединенной пылинки, обусловленных модуляцией разрядного тока с частотой 1-50 Гц. Для двух давлений измерены АЧХ колебаний пылинки при давлениях в зависимости от глубины модуляции разрядного тока. Обнаружены ангармонические эффекты: неизохронность, появление резонанса параметрического типа на удвоенной частоте, гистерезис. Количественное описание вынужденных колебаний пылинки проведено на основе теории ангармонического осциллятора. Определены пороговые и критические значения амплитуды вынуждающей силы для появления резонанса на удвоенной частоте и гистерезиса и соответствующие им критические и пороговые значения глубины модуляции тока, рассчитана форма потенциальной ямы, в которой пылинка совершает колебания. На основе исследования ангармонических колебаний уединенной пылевой частицы восстановлен профиль поля вблизи положения равновесия пылинки.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Актуальность настоящей работы обуславливается активным развитием исследований в комплексной плазме, которая за последние 25 лет изучения выделилась не только в отдельный тип плазмы, но и превратилась в междисциплинарную область исследований. Для создания упорядоченных структур часто используют разряд постоянного тока, в котором при достаточно низких давлениях функция распределения электронов (ФРЭ), сильно отличающаяся от равновесной. Учет нелокальной кинетики электронов в стратифицированном разряде при расчете реальной ФРЭ позволит точно определить значение ключевого параметра пылевой плазмы - заряда пылевой частицы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем. Предложены теоретический и экспериментальный методы расчета заряда уединенной пылевой частицы в стратифицированном разряде. Впервые рассчитан заряд уединенной пылевой частицы в стартах Р-типа при низких давлениях неона с учетом нелокальной кинетики электронов. Впервые метод модуляции разрядного тока был использован для исследования колебательных свойств уединенной пылевой частицы в страте. Впервые проведены исследования резонансных эффектов линейных вынужденных колебаний уединенной пылевой частицы в стратифицированном разряде, обнаружены нелинейные эффекты колебаний пылинки: неизохронность, резонанс на удвоенной частоте, гистерезис.

Практическая значимость работы определяется тем, что результаты работы могут использоваться в процессе обучения студентов на курсах теории колебаний, физики плазмы и физики комплексной плазмы в Федеральном государственном бюджетном

образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет».

Разработанные теоретический и экспериментальный метод расчета ключевого параметра пылевой плазмы – заряда пылинки, найденные значения колебательных характеристик плазменно-пылевой системы, проведенные исследования линейных и нелинейных резонансных эффектов колебательного движения пылинки в разряде постоянного тока имеют практическую значимость для исследований пылевой плазмы, проводимых в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих международных конференциях: 16th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas, Saint-Malo, France, September 24-28, 2018; 9th International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, 17 - 21 September, 2018; 42nd Assembly COSPAR, Pasadena, USA, July 14-22, 2018; 33rd International Conference on Equations of State for Matter, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, March 1–6, 2018; Scientific-Coordination Workshop "Non-ideal Plasma Physics", Moscow, Russia, November 29-30, 2017; The International Conference "The Physics of Low Temperature Plasma", Kazan, Russia, June 5-9, 2017; 8th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, Prague, Czech Republic, May 20–25, 2017; Scientific-Coordination Workshop "Non-ideal Plasma Physics", Moscow, Russia, December 7-8, 2016.

Основные результаты по теме диссертации **опубликованы** в 3 статьях в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК:

1. Golubovskii Y., Karasev V., Kartasheva A. Dust particle charging in a stratified glow discharge considering nonlocal electron kinetics // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. P. 115003.
2. Kartasheva A., Golubovskii Y., Karasev V. Dust Particle Charge in a Stratified Glow Discharge // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. Vol. 46. P. 723–726.
3. Golubovskii Y., Karasev V., Kartasheva A. Resonance properties of the single dust particle in a stratified glow discharge. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. P. 065006.

По содержанию работы Карташевой А.А. имеется ряд в общем-то несущественных замечаний, перечислим некоторые из них в порядке появления:

1. На стр. 11 в непронумерованной формуле и пояснении к ней путаются понятия тока и потока;
2. На следующей странице 12 в пояснении к формуле 1.1 не указано, какие сечения имеются в виду, под аргументом имеется в виду скорости или проекции скоростей, что означает тройка у знака дифференциала, тут же говорится о том, что модель предполагает пересечение ионов и электронов с поверхностью. На самом деле в модели полагается передача заряда при пересечении поверхности. На странице 34 тоже пишется, что «На частицу попадают электроны и ионы, траектории которых пересекают сечение поглощения», возникает вопрос, что имеется в виду?

3. На следующей странице 13 при изложении работ Л.Д. Цендина также допущено несколько неточностей - аналитическое решение уравнения Больцмана получено не на основе предположения о малости в энергобалансе доли упругих потерь, а о малости передачи энергии при упругом столкновении легкого электрона со значительно более массивным атомом. Но из-за того, что частота упругих столкновений значительно превышает частоту неупругих, общая доля упругих потерь в энергобалансе иногда может быть и преобладающей.
4. На стр. 31 говорится, что «При низких давлениях электронная теплопроводность, выравнивающая электронную температуру вдоль страты, преобладает в балансе энергий. Поэтому для вычисления профиля температуры необходимо решать уравнение теплопроводности. В данной работе электронная температура была рассчитана с помощью решения уравнения», далее приводится известное уравнение баланса (2.2) для симметричной части функции распределения, которое ниже соискатель называет уравнением теплопроводности. Говорить об электронной теплопроводности при давлении 0.2 Торр и размере порядка 1 см совершенно некорректно, поскольку перенос энергии происходит не из-за градиента температуры (т.е. теплопроводности - закон Фурье), а определяется скорее уравнением Власова. Уравнение «теплопроводности» (2.2) напоминает одномерное уравнение теплопроводности с членом конвективного переноса по энергетической оси функции распределения. Но неучет в массовом балансе появляющихся при ионизации частиц, в данной постановке компенсируется условием Дирихле для функции распределения на бесконечности. Неучет этого фактора может приводить, вообще говоря, к сколь угодно большой погрешности. В качестве примера можно указать на случай, когда неучет баланса с граничными условиями типа Неймана приводит к тому, что уравнение эллиптического типа вообще не имеет решения. Но ответ на этот вопрос можно получить, наверное, только сравнивая решение соискателя с результатом подробного моделирования из первопринципов методом частиц, что когда-нибудь кем-нибудь и будет сделано.
5. На рисунке 2.3 стр. 33, который вызывает у меня лично наибольший интерес, представлено распределение электрического поля в страте. К этому рисунку было бы полезно приложить более полную информацию – размер и заряд частицы, период страты и падение потенциала на ней, распределение средней энергии электронов в зависимости от высоты. Производились ли сравнение с зондовыми измерениями электрического поля?

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой диссертации. Полученные в ней результаты и выводы обоснованы и достоверны. **Личный вклад** Карташевой А.А. является определяющим. Автором создан модулятор разрядного тока, разработаны и реализован метод измерения амплитуды колебаний уединенной пылевой частицы в стратифицированном разряде. Экспериментальные результаты получены и проанализированы автором также самостоятельно.

Диссертация и автореферат написаны достаточно ясно и хорошо оформлены. Полученные результаты являются новыми, имеющими значительную научную и практическую ценность. На основании вышеизложенного считаю, что диссертация

представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Карташева Александра Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Ведущий научный сотрудник теоретического отдела
ИОФРАН д.ф.-м.н. Майоров Сергей Алексеевич



119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38, тел.: (499) 135-0247,
gpi.ru, e-mail: office@gpi.ru

И.о. ученого секретаря ИОФ РАН д.ф.-м.н. Андреев Степан
Николаевич

119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38, тел.: (499) 135-0247,
gpi.ru, e-mail: office@gpi.ru



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института общей физики им.
А.М. Прохорова Российской академии наук (119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38, тел.:
(499) 135-0247, gpi.ru, e-mail: office@gpi.ru)