

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Петрозаводский
государственный университет»
профессор В. С. Сюнёв



2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Карташевой Александры Александровны

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

Диссертационная работа Карташевой А.А. посвящена теоретическому и
экспериментальному исследованию колебательных свойств уединенной пылевой частицы,
удерживаемой в плазме 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 проблематике диссертации. В
обзоре содержится описание особенностей формирования функции распределения
электронов (ФРЭ) в стратифицированном разряде низкого давления. Рассмотрено
применение кинетического подхода для описания процесса зарядки пылевых частиц как в
приближении ограниченного орбитального движения, так и в случае
слабоионизированной плазмы. Рассмотрены эффекты, связанные с взаимным влиянием
параметров плазмы тлеющего разряда и параметров пылевых частиц. Отдельно
рассмотрены исследования колебательного движения пылинок. Также рассмотрены
известные в настоящий момент 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 ФРЭ в стратах Р-типа при низких давлениях неона. Рассчитана равновесная (Максвелловская) функция распределения электронов для сравнения с нелокальной ФРЭ. Исследовано влияние вида ФРЭ на распределение концентрации электронов вдоль страты. Рассчитаны плотности электронного и ионного токов в зависимости от потенциала пылинки вдоль страты. Продемонстрировано влияние вида ФРЭ на распределение электронного тока. Рассчитано распределение потенциала и зарядового числа пылинки вдоль страты для нелокальной и Максвелловской ФРЭ. Получено значение зарядового числа уединенной пылевой частицы.

В третьей главе описана экспериментальная установка для исследования колебательных свойств плазменно-пылевой системы. Также в этой главе предложен экспериментальный метод расчета заряда уединенной пылевой частицы в страте. В основе метода лежит исследование затухающих колебаний уединенной пылевой частицы, вызванного модуляцией разрядного тока импульсами с коротким фронтом. Релаксационные колебания пылинки в страте измерены в диапазоне давлений $p=0.06-0.38$ торр. На основе экспериментально определенного значения 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. Измерены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) вынужденных колебаний пылинки в зависимости от давления. Для двух низких давлений из исследуемого диапазона обнаружены резонансные максимумы на собственной частоте системы и на кратных ей частотах. Количественное описание вынужденных колебаний пылинки было проведено на основе теории гармонического осциллятора. Получены значения колебательных характеристик плазменно-пылевой системы: собственной частоты, резонансной частоты, коэффициента затухания, логарифмического декремента. Проведено исследование влияния формы модулирующего сигнала на АЧХ колебаний пылинки. Значение собственной частоты плазменно-пылевой системы получено с помощью измерения резонанса скорости и сдвига фаз вынужденных колебаний. Получено значение добротности плазменно-пылевой системы, имеющей порядок нескольких единиц, что говорит о большой степени диссипации системы.

В пятой главе исследованы нелинейные вынужденные колебания уединенной пылевой, обусловленные модуляцией разрядного тока с частотой 1-50 Гц. Для двух давлений измерены АЧХ колебаний пылинки в зависимости от глубины модуляции разрядного тока. Обнаружены ангармонические эффекты: неизохронность, появление резонанса на удвоенной частоте с пороговым характером возникновения, гистерезис амплитуды. Количественное описание нелинейных колебаний пылинки проведено на основе теории ангармонического осциллятора. Определены пороговые и критические значения амплитуды вынуждающей силы для появления резонанса на удвоенной частоте и гистерезиса, а также соответствующие им критические и пороговые значения глубины модуляции тока. На основе вычисленных коэффициентов нелинейности плазменно-пылевой системы рассчитана форма потенциальной ямы плазменно-пылевой системы. 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 области комплексной плазмы. За 20 лет исследования комплексная плазма превратилась

не только в отдельный тип плазмы, но и в междисциплинарную область исследования, важную для ряда наук. Для создания упорядоченных структур часто используют разряд постоянного тока, в котором при достаточно низких давлениях ФРЭ сильно отличается от равновесной. Учет нелокальной кинетики электронов в стратифицированном разряде при расчете нелокальной ФРЭ позволит точно определить значение такого ключевого параметра пылевой плазмы, как заряд пылевой частицы.

Научная новизна диссертационной работы. 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. Впервые обнаружены нелинейные эффекты колебаний пылинки: неизохронность, резонанс на удвоенной частоте, гистерезис.

Теоретическая значимость работы. В результате проведенных исследований получены новые сведения о пылевой плазме, в частности о зарядке уединенной пылевой частицы в стратифицированном разряде низкого давления и о колебательных свойствах плазменно-пылевой системы.

Функция распределения электронов в стратифицированном разряде, полученная на основе численного решения уравнения Больцмана, позволила оценить влияние нелокальной кинетики электронов на процесс зарядки уединенной пылевой частицы газовом разряде постоянного тока. Показано, к каким качественным и количественным ошибкам в определении заряда пылинки может привести использование равновесной (Максвелловской) ФРЭ.

Исследование степени диссипации плазменно-пылевой системы, проведенное с помощью АЧХ вынужденных колебаний пылинки, важно для понимания процессов самоорганизации пылевой компоненты.

Практическая значимость. Используемая низкочастотная модуляция разрядного тока является неинвазивным способом возбуждения релаксационных колебаний, лежащих в основе разработанного метода определения заряда пылинки.

Исследование вынужденных колебаний пылевой частицы позволяет количественно охарактеризовать колебательные свойства плазменно-пылевых систем. В частности, два независимых способа определения собственной частоты системы могут быть использованы в широком диапазоне разрядных условий.

Проведенное количественное описание нелинейных вынужденных колебаний уединенной пылевой частицы в страте показывает возможность использования пылинок в качестве высокоточного, неинвазивного зонда для определения параметров фоновой плазмы.

Примененный метод модуляции разрядного тока позволил на кинетическом уровне исследовать отклик плазменно-пылевой системы на изменение таких параметров как форма модулирующего сигнала, глубина модуляции. Результаты работы могут использоваться в процессе обучения студентов на курсах теории колебаний, физики плазмы, физики газового разряда 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, определённые 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 Объединенным институтом высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

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

Диссертационная работа организована логично, написана понятным языком.

Замечания по диссертации.

1. Пылевая частица освещалась лазерным излучением (рисунок 3.7). Не сказано проводилась ли оценка влияния давления излучения на динамику движения частицы. Учитывалось ли это в уравнениях движениях, например, 3.1.

2. При расчете плотности тока на пылевую частицу (формула 2.6) для направленной скорости ионов использовалось выражение $u = b_i E$. По условиям разряда (давление $p < 1$ тор) $u \sim \sqrt{E}$. Формула для направленной скорости ионов $u = 0.606 * 10^4 \sqrt{\frac{T}{M} \frac{x}{1+0.589*\sqrt{x}}} \approx$

$$\sqrt{\frac{T}{M}} \sqrt{x}, \text{ где } x = \frac{eE}{\sigma_T n_a T}.$$

3. При расчете плотности электронного тока на пылевую частицу (формула 2.5) введен коэффициент отражения электронов $\xi(v, \theta)$ неясно чему он равен. При этом в выражении для плотности j_e не учтены возможные процессы эмиссии электронов с поверхности пылевой частицы такие, как вторичная электронная эмиссия, ион-электронная эмиссия, ион-электронная эмиссия, фотоэлектронная эмиссия, термополевая.

4. Можно сделать несколько замечаний по оформлению рукописи. В размерностях используется то кириллица, то латиница, например, стр. 58. На странице 67 в выводах к главе опечатка в значении давления, $p=0.06$ торр вместо $p=0.16$ торр.

Отмеченные замечания не уменьшают ценности работы. Результаты, полученные в работе Карташевой А.А., имеют высокую научную ценность и могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением комплексной плазмы, физики газового разряда и газоразрядной плазмы.

Выводы

Диссертационная работа Карташевой Александры Александровны представляет собой законченный научный труд. Представленные теоретические и экспериментальные исследования колебательных свойств уединенной пылевой частицы в стратифицированном разряде выявляют закономерности физических процессов связанных

с динамикой заряженных микрочастиц и могут способствовать развитию ряда практических приложений в широких диапазонах параметров.

Основные результаты работы опубликованы в открытой печати в научных журналах, обсуждались на российских и международных конференциях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертации. Задачи, рассмотренные и решенные в диссертации Карташевой А.А., имеют существенное значение для развития перспективного направления в области физики комплексной плазмы.

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.

Отзыв подготовлен профессором кафедры электроники и электроэнергетики ПетрГУ, доктором физико-математических наук Мольковым Сергеем Ивановичем.

Отзыв рассмотрен и утвержден на семинаре кафедры общей физики и кафедры электроники и электроэнергетики ПетрГУ.

Профессор кафедры электроники и электроэнергетики ПетрГУ,
доктор физико-математических наук, доцент



С.И. Мольков