

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
от 27 марта 2019 г. (протокол № 3)

Защита диссертации **Карташевой Александры Александровны**  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
**«Колебательные свойства плазменно-пылевой системы в  
стратифицированном разряде»**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Москва – 2019

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
Протокол № 3 от 27 марта 2019 г.

Диссертационный совет Д 002.110.02 утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 22 человек, из них 11 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 9 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
2	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
3	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
4	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
12	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
13	Гордон Е.Б.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Отсутствует
15	Дьячков Л. Г.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
16	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
17	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
18	Иванов М.Ф.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
19	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
21	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
22	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
23	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
24	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
25	Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
26	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
27	Савватимский А.И.	Д.т.н.	01.04.14	Присутствует
28	Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
29	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
31	Якубов И.Т.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита инженера-исследователя кафедры общей физики-I Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения Высшего Образования «Санкт-Петербургский Государственный Университет» **Карташевой Александры Александровны** на тему «Колебательные свойства плазменно-пылевой системы в стратифицированном разряде». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Диссертация выполнена на кафедре оптики Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения Высшего Образования «Санкт-Петербургский Государственный Университет» (198504, г. Санкт-Петербург, ул. Ульяновская, д. 3, srbu.ru).

### **Научный руководитель:**

**Голубовский Юрий Борисович** – профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптики Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждения Высшего Образования «Санкт-Петербургский Государственный Университет», г. Санкт-Петербург.

### **Официальные оппоненты:**

**Майоров Сергей Алексеевич** - гражданин РФ, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник теоретического отдела Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФРАН; Россия, 11991, г. Москва, Вавилова ул., 38).

**Очкин Владимир Николаевич** – гражданин РФ, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник отделения оптики Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН; Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект 53.)

### **Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ; Россия, 185910, Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33)

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Майоров С.А. и д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Очкин В.Н, научный руководитель Карташевой А.А. д.ф.-м.н. Голубовский Ю.Б..

### **Ученый секретарь**

Пора начинать наше заседание. Сегодня на повестке дня защита Карташевой Александры Александровны на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Она обратилась в наш диссертационный совет с просьбой принять к защите ее работу по теме «Колебательные свойства плазменно-пылевой системы в стратифицированном разряде», выполненной под руководством д.ф.-м.н. Голубовского Юрия Борисовича. Эта работа была заслушана у нас на семинаре и рассмотрена экспертной комиссией в составе: Леонида Михайловича Василяка, Алексея Георгиевича Храпака и Льва Гавриловича Дьячкова, которые дали свое заключение о том, что работа рекомендуется к защите в нашем диссертационном совете. В деле имеются все документы, оформленные с требованием ВАК. С вашего позволения зачитывать их я не буду. Если есть вопросы я готов на них ответить. Если вопросов нет, тогда дадим Александре Александровне слово. У Вас 20 минут.

### **Карташева А. А.**

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Князева Д.В. прилагается).*

### **Ученый секретарь**

Спасибо, Александра Александровна. Вопросы? Пожалуйста, Алексей Юрьевич

### **Вараксин А.Ю.**

Александра Александровна, в каждой работе основные позиции для диссертационного исследования это новизна и актуальность. У Вас в докладе не прозвучало ничего о том, что были какие-то предшествующие исследования близкие по теме к Вашему, касающиеся и экспериментального плана, и расчетно-теоретического. Если были, то в чем Ваша новизна и в чем естественно актуальность. Мы привыкли в начале из предыдущих исследований понятно для чего это нужно.

### **Карташева А. А.**

Спасибо за вопрос. В начале, о том, какие работы существуют по исследованию колебательного движения плазменно-пылевой системы. В рамках моей работы исследованы три вида колебательного движения затухающие, линейные и нелинейные колебания. Что касается затухающих колебаний, то с помощью них был определен заряд уединенной пылевой частицы. Это было сделано впервые, то есть до этого данные тип колебаний не использовался для определения заряда пылевой частицы. Два остальных типа колебаний (линейные, нелинейные) ранее исследовались в условиях ВЧ разряда. Мы же в своих исследованиях используем стратифицированный разряд. Кроме того, в высокочастотном разряде использовалась модуляция напряжения, то есть в разряд был внесен зонд, на который подавался модулирующих сигнал. Использованный нами метод модуляции тока является неинвазивным, то есть в сам разряд не вносятся никаких дополнительных элементов, мы модулируем сам разрядный ток. Работ по исследованию колебательного движения с резонансным характером достаточно мало. Это работы Мельцера, в которых исследовались как линейные так и нелинейные режимы.

Что касается актуальности. Колебательные свойства плазменно-пылевой системы позволяют определить ключевой параметр частицы - ее заряд. Кроме того в рамках

диссертации нелинейные колебания пылинки были использованы для того, чтобы рассчитать профиль поля вблизи положения равновесия пылевой частицы. Следовательно, мы используем результаты данного исследования как для расчета параметров самой пылевой плазмы, так и для расчета параметров разряда, в котором она находится.

**Ученый секретарь**

Еще вопросы.

**Дьячков Л.Г.**

В каких стратах проводились измерения, ведь в разряде несколько страт. В частности измерение заряда пылинки проводилось в какой страте?

**Карташева А. А.**

Все измерения проводились во второй, начиная от диафрагмы, страте. Вообще говоря, в каждой из 6 страт возможно было наблюдать как объемные пылевые структуры, так и уединенную пылевую частицу. Нам было удобно построить схему визуализации таким образом, чтобы проводить исследования во второй страте, но можно проводить наблюдения в любой из 6 страт.

**Дьячков Л.Г.**

Можно. Но не проводились? Потому что интересно было бы сравнить, в разных стратах результат получается тот же самый, в частности заряд, или все-таки чем-то отличается?

**Карташева А. А.**

Нет, амплитудно-частотные характеристики (*далее АЧХ*) не измерялись в какой-то другой страте. Когда проводится эксперимент мы могли наблюдать, что амплитуды и резонансная частота совпадают для каждой из 6 страт. То есть пылинки попадают в каждую страту, соответственно, мы можем наблюдать, что резонансная частота 21 Гц и амплитуда порядка 1-2 мм.

**Дьячков Л.Г.**

То есть можно сказать, что результат был бы одним и тем же?

**Карташева А. А.**

Да.

**Петров О.Ф.**

У меня будет два вопроса. Второй будет вытекать из первого. Для каких частиц Вы определяли заряд. Это в эксперименте имеет большое значение.

**Карташева А. А.**

4 мкм – диаметр пылевых частиц. Меламинформальдегид – материал, из которого они состоят.

**Петров О.Ф.**

Следующий вопрос была ли у Вас задача изучения зависимости заряда от размера частиц, от формы и, как ни странно, от материала частиц.

**Карташева А. А.**

На первом этапе нашего исследования мы проводили эксперименты с одномикронными частицами, но, к сожалению, нам не удалось получить резонансных кривых. Несмотря на то, что масса меньше, резонансного поведения мы не наблюдали. Вопрос остается открытым. Далее мы взяли четырехмикронные частицы и получили соответствующие результаты. Здесь важно использовать именно калиброванные частицы. То есть каждый раз бросать частицы одного и того же размера. С хорошей точностью мы знаем, что этот размер  $4 \pm 0.14$ , и мы остановились на данном размере. В лаборатории, к сожалению не было калиброванных частиц другого состава, то есть был только меламин-формальдегид 4 микрона.

**Петров О.Ф.**

То есть все-таки их было 2 размера 1 и 4. Это все по диаметру?

**Карташева А. А.**

Да по диаметру. Да были частицы 2 размеров, но в диссертации не приведены результаты с одномикронными частицами. Что касается формы мы бросали только сферические частицы.

**Храпак А.Г.**

Вы технически отслеживали только 1 частицу? Или вам удавалось вбросить только 1 частицу?

**Карташева А. А.**

Нам удавалось вбросить именно 1 частицу. Достоинство нашего эксперимента в том, что мы можем избежать влияния других частиц на результат, то есть не учитывать наличие других пылинок как в расчетах, так и в экспериментах. Согласно фотографии, представленной на слайде пылевая частица действительно одна и больше в страте нет ничего.

**Васильев М.Н.**

Вдогонку вопроса Олега Фёдоровича. Газ как-нибудь влияет на АЧХ или нет? И на заряд, кстати, тоже.

**Карташева А. А.**

Да, конечно, если мы будем использовать другой газ...

**Васильев М.Н.**

И второе, почему именно неон?

**Каргашева А. А.**

Изначально мы выбрали неон для проведения эксперимента, поскольку мы получили устойчивые АЧХ, то зафиксировали параметр типа газа и проводили исследования только в неоне. Вакуумная система экспериментальной установки позволяла проводить исследования в криптоне, но нельзя разом менять все параметры. Мы меняли давление газа.

**Васильев М.Н.**

То есть в других газах вы не экспериментировали?

**Каргашева А. А.**

Нет, не экспериментировали.

**Василяк Л.М.**

Я знаю, что в лаборатории Юрия Борисовича очень хорошо умеют измерять параметры страт. И Вы сказали, что в соответствии с определенным сечением и с учетом функции распределения, Вы можете вычислить величину заряда. Затем Вы его измерили. Но не прозвучало, эти заряды как-то сопоставлялись, совпадают ли значения. Или может за счет того, что происходит движение, есть какое-то усреднение заряда пылевой частицы, и оно совпадет с расчетным. Как эти данные соотносятся?

**Каргашева А. А.**

Рассчитанное значение зарядового числа это  $1.4 \cdot 10^4$ . Экспериментальный метод состоял в исследовании релаксационных колебаний, которые позволили определить собственную частоту. Релаксационные колебания это не вынужденные, то есть нам точно известно положение равновесия пылевой частицы и точно знаем, что это единственная частица. Соответственно, при затухании есть собственная частота системы, которая непосредственно связана с двумя параметрами: это заряд и профиль поля (производная профиля поля). Мы получили экспериментальное значение зарядового числа  $1.9 \cdot 10^4$ . Теперь можем количественно сравнить значения, с одной стороны это 1.4 с другой 1.9. Они находятся в хорошем соответствии, потому что погрешность наших экспериментов, связанная в основном с погрешностью измерения собственной частоты, составила 12% , соответственно по квадрату частоты 24% . То есть в пределах погрешности эти данные хорошо совпадают.

**Савватинский А. И.**

У меня вопрос повторный насчет уединённой частицы. Можно считать, что уединенная частица это просто отдельная частица?

**Каргашева А. А.**

Да.

**Савватинский А. И.**

Так почему термин «уединенная»? Вы берете из ансамбля 1 частицу и помещаете ее в чашку Петри и исследуете?

**Карташева А. А.**

Нет

**Савватинский А. И.**

Как это происходит? У Вас есть ансамбль, и как Вы выделяете эту частицу? Или просто фокусируетесь на этой частице и ее исследуете, а ансамбль остается?

**Карташева А. А.**

Нет, она отдельная.

**Савватинский А. И.**

Как Вы ее берете оттуда, не понятно.

**Карташева А. А.**

*(Слайд с экспериментальной установкой)* Вверху трубки находится контейнер с пылевыми частицами (номер 3 на схеме экспериментальной установки). Перемещая контейнер мы можем бросить определенное количество частиц. И мы научились настолько минимально сдвигать этот контейнер, что в страте появляется только 1 частица. Возможно, термин уединенная вводит в заблуждение, она действительно отдельная. То есть она не взята из ансамбля, она взята из контейнера с монодисперсными частицами.

**Амиров Р.Х.**

У меня вопрос не совсем по теме. Вы очень аккуратно рассчитываете функцию распределения. Если проводит расчеты гелии, то у него есть особенность очень большую роль играют метастабильные состояния. Вот ваш подход один к одному пойдет для расчета функции распределения в гелии? Все-таки надо ли там будет учитывать его метастабильные состояния при расчёте функции распределения?

**Карташева А. А.**

В данных расчетах мы не учитывали метастабильные состояния. Но я согласна, что можно учесть, можно также учесть отрицательные ионы, которые там появятся, потому что частица меламина-формальдегид, что-то испаряется. Возможно, дорабатывать эту теорию. Действительно, появляются какие-то особенности, и они будут влиять на поток ионов и электронов, и заряд пылинки будет другим. Но в приближении OML модели, при данной функции распределения у нас получились представленные значения заряда и потоков.

**Амиров Р.Х.**

Вы, наверное, опирались на известные работы, на известные расчеты функции распределения. Это не Ваша часть, Вы взяли некую готовую теорию. В рамках этой теории учитываются где-то метастабильные состояния при тех сильно неоднородных условиях.

**Карташева А. А.**

В работах ЮБ рассчитываются ФРЭ для различных давлений, для различных страт, для различных газов.

**Амиров Р.Х.**

И метастабели там учитываются?

**Карташева А. А.**

Да.

**Дьячков Л.Г.**

У меня тоже вопрос по ФРЭ. Можете показать слайд, на котором представлена рассчитанная ФРЭ? Вот пички маленькие, можете пояснить, с чем они связаны?

**Карташева А. А.**

С энергией электронов.

**Дьячков Л.Г.**

Почему возникает второй максимум?

**Карташева А. А.**

Это особенность формирования страт Р-типа. На рисунке представлены функции распределения для различных типов страт: S P и R. Для того чтобы электрон испытал неупругое соударение с атомом неона, то есть достиг энергии 16.6 эВ, ему нужно пройти две длины страты. Соответственно, поскольку 2 длины, то появляются 2 максимума перемещающихся в плоскости энергия координата. Что касается S страты, то чтобы электрон достиг энергии 16.6 эВ, нужно ему пройти 1 длину страты, то есть это примерно 4 см.

**Дьячков Л.Г.**

То есть с нелокальностью функции распределения электронов.

**Карташева А. А.**

Да

**Ученый секретарь**

Еще вопросы. Тогда с вашего позволения я задам пару вопросов. Первый вопрос у меня связан с постановкой эксперимента. Если я правильно понял схему, то лазер находится сверху и светит аксиально. То есть сила светового давления может дополнительно воздействовать на пылевые частицы в вертикальном направлении и участвовать в механизме движения, в раскачке колебаний. Учитывалось ли это?

**Карташева А. А.**

Мощность нашего лазера маленькая – 30 mW. Угол рассеяния большой. Для того, чтобы давление света действительно играло большую роль, это должен быть сфокусированный лазерный луч. Есть работа В. И. Молоткова, М. Пустыльника и пр., где

они измеряют заряд пылинки, толкая ее лазерным лучом. И в этой работе мощность лазера 200 mW. В нашем случае и мощность маленькая, и рассеяние большое, то есть никак не учитывается и не влияет никак.

### **Ученый секретарь**

Хорошо. Второй вопрос связан с газовым разрядом. Как вы контролируете частоту буферного газа? Потому что известно, что в ходе эксперимента у Вас могут испаряться электроды, у Вас может расплыться вставка, концентрирующая страты у вас может идти дегазация стенок и пылевых частиц. При этом, например, в результате испарения электродов Вы получаете металлические ионы, потенциал ионизации которых значительно ниже, чем потенциал ионизации того же иона, который Вы используете в эксперименте, и значит у Вас могут быть ионы не неона, а металла, из которого выполнены электроды.

### **Карташева А. А.**

Во-первых, у нас небольшой ток 2-3 мА, то есть не идет сильного испарения поверхности катода, например. Во-вторых, мы следим за частотой газа, то есть эксперименты долгое время в одном газе не проводятся, После двух часов работы он заменяется на чистый и снова проводятся эксперименты. Действительно, что-то может испаряться, но мы считаем, что эта доля минимальна и рабочий это неон. В чистом газе страты образуются за счет того, что присутствует вставка. То есть говорят, что в чистом неоне страт не бывает, но если мы поставим сужающую канал тока диафрагму, да еще и сделаем поворот трубки, то из-за возмущения у нас появятся страты в чистом неоне.

### **Ученый секретарь**

Хорошо. Ответ получен. И последний вопрос уточняющий. Какая паспортная частота неона использовалась в эксперименте. Частота газа, какая у вас была? Две девятки, три девятки, пять девяток.

### **Карташева А. А.**

Думаю, что 3 девятки.

### **Ученый секретарь**

То есть у Вас 1 десятая процента может быть примеси?

### **Карташева А. А.**

Да. Использовался чистый газ напуска.

### **Ученый секретарь**

Коллеги, не появилось ли еще вопросов? Александра Александровна спасибо. Тогда мы должны предоставить слово научному руководителю. Юрий Борисович, пожалуйста. О соискателе, не о работе.

### **Голубовский Ю. Б.**

Александра Александровна окончила Ростовский университет по специальности радиофизика и приехала к нам в лабораторию поступать в аспирантуру. Ей пришлось

переквалифицироваться, освоить физику неравновесной газоразрядной плазмы, разобраться в довольно сложных вопросах кинетики электронов, прослушать целый курс лекций, которые читаются нашим студентам в аспирантуре, то есть и освоить всю эту науку, связанную с неравновесной газоразрядной плазмой. Конкретно работала она в группе профессора Карасева В.Ю., который занимается пылевой плазмой, а я консультировал. Ну что в результате? Оказалось, что можно взять интересный объект - стоячие страты, взять такой объект как изолированная пылинка и получить целый ряд интересных результатов. Вот тот круг вопросов, который она освоила, который она выполнила, набрала экспериментальный материал, обобщила его и представила его в качестве кандидатской диссертации. Вот что я могу сказать по поводу работы Александры Александровны.

### Петров О. Ф.

У меня вопрос небольшой Юрию Борисовичу. А какая дальнейшая судьба у Александры Александровны.

### Голубовский Ю. Б.

У нее есть персональный грант РФФИ, а дальше тут возможностей много. Вот сейчас она поедет в Германию на месяц к М. Пустыльнику, далее будет видно. Она приобрела высокую квалификацию, разобралась в нелинейной колебательной науке по Ландау, применила ее, мне кажется вполне заслуживает искомой степени.

### Ученый секретарь

Спасибо, Юрий Борисович.

Следующим пунктом мы должны познакомиться с отзывами ведущей организации и отзывами на автореферат Александры Александровны. С Вашего позволения начну с отзывов на авторефераты. Поступило **семь отзывов**, все отзывы **положительные**, ряд отзывов имеет замечания.

(Первый отзыв) Отзыв поступил из **Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН**. Отзыв составил главный научный сотрудник лаборатории 4.1 ИТ СО РАН, профессор каф. физики неравновесных процессов, д.ф.-м.н., **Сухинин Геннадий Иванович**. Отзыв положительный, с вопросами:

1. В работе использовались частицы только одного размера (заряда),  $d = 4\text{мкм}$ . Почему не использовались частиц с другим диаметром? Это позволило бы усилить результаты по теории колебаний.

2. Добротность рассмотренных колебаний оказалась порядка  $Q$  □ 5, свидетельствует о достаточно сильной диссипации. Уменьшение размера частиц приведет к уменьшению силы трения Эпштейна и увеличению добротности рассматриваемых колебаний.

3. Следовало бы указать точность, с какой точностью можно определить электрическое поле по измеренным характеристикам колебаний пылевых частиц, и в какой области страт это возможно сделать.

4. Встречаются описки. Например, в формуле (2), стр.13 следует собственную частоту  $\omega_0$  возвести в квадрат:  $\omega_0^2 = qE'(z_0)/M_d$ .

При этом делается заключение, что вышеуказанные замечания и вопросы не снижают научной значимости, а соискатель удовлетворяет всем критериям, установленным п.9 положения о порядке присуждения ученых степеней и заслуживает присуждения искомой степени.

*(Второй отзыв)* Отзыв поступил из **Московского Государственного Университета им. Ломоносова**. Отзыв составил ведущий научный сотрудник каф. физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ, д.ф.-м.н., доцент **Швилкин Борис Николаевич**. Отзыв без замечаний с недостатками. К недостаткам работы, которые являются несущественными, можно отнести:

1. Некоторая незавершенность в интерпретации полученных автором резонансных кривых, в чем признается и сам автор на странице 20.

2. Не приводятся четких указаний на условия возбуждения релаксационных колебаний.

3. В тексте встречаются повторы, например, в самом начале главы четвертой и пятой автореферата.

4. Приводятся разные данные о верхнем диапазоне давлений неона 0.4 торр (стр. 12) и 0.66 торр (стр.14).

*(Третий отзыв)* Отзыв поступил из **Объединенного Института Высоких Температур РАН**. Отзыв составил главный научный сотрудник лаборатории №1.2.1.1 Научно-исследовательского центра теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур, д.ф.-м.н., **Жуховицкий Дмитрий Игоревич**. Отзыв положительный, без замечаний.

*(Четвертый отзыв)* Отзыв поступил из **ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований**. Отзыв составил ведущий научный сотрудник Центра Теоретической физики и Вычислительной математики ГНЦ РФ ТРИНИТИ Госкорпорации «Росатом» к.ф.-м.н. **Кочетов Игорь Валерьянович**. Отзыв положительный, с замечанием:

1. При сравнении зависимости расчетных средних энергий электронов и их концентраций вдоль стратифицированного разряда при использовании Максвелловской локальной ФРЭЭ и полученной из численного решения нелокального уравнения Больцмана представляет еще и интерес сравнение с расчетами, полученными при использовании локального уравнения Больцмана для ФРЭЭ.

*(Пятый отзыв)* Отзыв поступил из **Ухтинского государственного технического университета**. Отзыв составил заведующий каф. физики УГТУ д.ф.-м.н., профессор **Некучаев Владимир Орович**. Отзыв положительный, с замечанием:

1. В работе используются прямоугольные импульсы модуляции тока, тогда как в теории ангармонического осциллятора предполагается синусоидальная модуляция.

*(Шестой отзыв)* Отзыв поступил из **Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова**. Отзыв составил профессор каф. физики ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, д.ф.-м.н. **Полищук Владимир Александрович**. Отзыв положительный, без замечаний.

*(Седьмой отзыв)* Отзыв поступил из Южного Федерального Университета. Отзыв составил профессор физического факультета ФГАОУ ВО ЮФУ, д.ф.-м.н. Иванов И.Г. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. не обосновывается выбор для исследования именно Р-страт, и интересно, можно ли применить выводы работы к R-стратам.

2. Известно, что аэрозольные частицы собирают на своей поверхности электроны, что увеличивает напряженность эл. поля ПС и изменяет параметры страт, поэтому интересно, чем автор объясняет выбор в качестве пылевых частиц именно меламин-формальдегида, а также, как размеры частиц могут повлиять на результаты эксперимента.

Также есть отзыв от ведущей организации. В качестве ведущей организации был предложен **Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Петрозаводский государственный университет»**. С Вашего позволения отзыв целиком от ведущей организации я зачитывать не буду, остановлюсь только на структуре и замечаниях. Во-первых, в отзыве обсуждается структура и содержание диссертационной работы, отмечается научная новизна, теоретическая и практическая значимость и сформулирован ряд вопросов и замечаний.

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. Следующий вопрос относительно скорости ионов. При расчете плотности тока на пылевую частицу (формула 2.6) для направленной скорости ионов использовалось выражение  $u = b_i E$ . По условиям разряда (давление  $p < 1$  торр)  $u \sim \sqrt{E}$ . Формула для направленной скорости ионов (приводится длинное налитическое выражение)

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, 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.

Отзыв подписан профессором кафедры доктором физико-математических наук, доцентом **Мольковым Сергеем Ивановичем** и утвержден проректором по научной работе д.т.н. профессором **Сюнёвым Владимиром Сергеевичем**.

Александра Александровна, Вам время для того, чтобы ответить на замечания. Если можно сгруппируйте те, которые были на одну тему.

### **Карташева А. А.**

*(Первый отзыв)* Что касается отзыва Геннадия Ивановича Сухинина. На основе анализа литературы и выбранных экспериментальных условий были использованы частицы размера 4 мкм. Я уже говорила, что с одномикронными не удалось получить резонансных АЧХ, поэтому выбор диаметр на 4 мкм, и мы получили соответствующие экспериментальные данные. Действительно, было бы интересно посмотреть что будет, если использовать другие условия, другую форму, другой состав частиц, но то это тема дальнейших исследований.

Также Геннадий Иванович говорит, что уменьшение размера приведет к уменьшению силы Эпштейна и увеличению добротности. Да, действительно, возможно это так, но это тема дальнейших исследований.

Также Геннадий Иванович говорит о восстановлении профиля поля. В рамках диссертации проводились исследования возможности восстановления профиля поля вблизи положения равновесия пылинки с учетом коэффициентов нелинейности альфа и бета. (*график на слайде*) Мы знаем зависимость возвращающей силы с учетом нелинейных коэффициентов, далее можем разложить заряд в ряд Тейлора, так как ранее получили его зависимость от координаты, следующий шаг - восстановление профиля поля. Сухинин Г. И. спрашивает, с какой точностью я могу провести эти эксперименты. Основной параметр, который влияет на точность - это заряд, величина которого определена в эксперименте. Погрешность определения заряда это 24%, он вносит основной вклад. То есть можно говорить, что погрешность восстановления профиля поля около 20%.

Да действительно, встречаются опечатки. Приношу свои извинения.

(*Второй отзыв*). Действительно, есть некая незавершенность в интерпретации нелинейных колебаний, не проводилось исследование вида вынуждающей силы на АЧХ в случае нелинейного режима. Это тема дальнейших исследований. Мы предполагаем, что основной вклад вносит первая гармоника в разложении в ряд Фурье вынуждающей силы. Неплохое согласие экспериментальных данных с теоретическим описанием подтверждает этот вывод.

Нет четкого указание на условия исследования релаксационных колебаний. Возможно это так, но изменять сильно, например, ток разряда мы не можем, так как ограничены временем жизни катода, то диапазон токов это 2-3 мА. Не можем исследовать другие частицы, так как мы уже взяли 4 мкм и с ними необходимо провести все измерения колебательного движения. Единственный параметр, который мы можем изменять в широком диапазоне, это давление. Зависимость от давления релаксационных кривых представлена на слайде. Опять же тема дальнейших исследований посмотреть как изменятся АЧХ, если варьировать какой-то параметр, например, сорт газа.

Говорится о том, что приводятся разные данные о верхнем диапазоне неона. Да, действительно, данные разные, но в случае исследования релаксационных колебаний давление изменялось от 0.06 до 0.4 тора (*показывает рисунок на слайде*). Далее при увеличении давления отклик системы будет полностью повторять вид вынуждающей силы, то есть иметь вид прямоугольных импульсов. Следовательно, исследование релаксационных колебаний при  $p > 0.4$  по сути бессмысленно, а при давлении 0.6 тора и амплитуда и вовсе станет минимальна. В случае исследования именно линейных вынужденных колебаний важно посмотреть более широкий диапазон, так как мы можем наблюдать, что при 0.6 амплитуда 0. Затем мы можем проследить рост амплитуды, то есть рост значений амплитуды в зависимости от давления (*показывает рисунок на слайде*).

Также говорится, что в тексте встречаются повторы в начале 4 главы и в начале главы 5 автореферата. Да в начале повторяются описания экспериментальных условий, но мне показалось, что так материал будет нагляднее и доступнее для читателя.

(*Четвертый отзыв*). Да, действительно, было бы интересно рассчитать параметры с учетом локального уравнения Больцмана, но это требует решения уравнения теплопроводности, что является достаточно трудоемкой задачей. Кроме того, использование нелокальной кинетики электронов и решение нелокального уравнения Больцмана дает более точные результаты.

(*Пятый отзыв*) Владимир Орович в недостатке указывает использование только лишь прямоугольного импульса для модуляции разрядного тока и исследовании его влияния на

колебания пылинки. Были рассчитаны АЧХ колебаний пылинки (*показывает графики на слайде*) из которых видно, что на форму резонансного максимума на основной частоте вид вынуждающей силы не влияет. Кроме того, амплитуда колебаний имеет достаточно большой размах, поэтому влияние субгармоник мы можем не учитывать. Все ключевые параметры: добротность, собственная частота, заряд были рассчитаны с использованием первой гармоники в разложении в ряд Фурье вынуждающей силы, то есть дополнительные субгармоники при расчетах не использовались. Кроме того, теория нелинейного осциллятора позволяет нам учитывать вид вынуждающей силы и получать хорошее теоретическое описание экспериментальных данных.

(*Седьмой отзыв*). Не обосновывается выбор для исследования страт Р-типа. Можно ли применить расчеты и значения для страт R-типа. В наших экспериментальных условиях существовали именно страты Р-типа. Об этом мы можем судить по падению потенциала на длине страты. То есть на двух стратах у нас падает 17.7 эВ, это соответствует развитой теории страт Р-типа. Да, расчеты можно провести для страт R-типа. Все тоже самое: получим функцию распределения электронов, рассчитаем потоки ионов и электронов, вычислим заряд. На следующем этапе нужно будет подобрать такие экспериментальные условия, чтобы существовали именно R-страты и в них удержать пылинку. Тема дальнейших исследований - изменить вид страт.

Известно, что аэрозольные частицы собирают на своей поверхности электроны, которые увеличивают напряженность электрического поля. Да, в последнее время во многих работах уделяется большое внимание именно этой тематике. Например, последние работы Г. И. Сухина посвящены исследованию влияния пыли на свойства стратифицированного разряда. То есть исследуется не одна пылевая частица, а облако пылевых частиц, которые являются стоком электронов. Далее исследуется электрическое поле, оказывается, что оно увеличивается. Соответственно изменяется концентрация электронов вблизи поверхности частиц, уменьшается их заряд. Кроме того, интересны работы Зобнина А.В. Недавно вышла его статья, где проводились как экспериментальные исследования, так и теоретические расчеты для установки ПК4. В работе говорится о том, что вброс пылинок в dc разряд приводит к образованию страт, то есть локальное возмущение приводит к образованию неоднородностей. Все это действительно, интересно, но в рамках данной работы все-таки исследовалась уединенная пылевая частица без влияния других. Как я уже говорила можно использовать частицы другого диаметра, размера, формы и повторить все проведенные исследования.

Это что касается авторефератов.

(*Отзыв ведущей организации*) Первый вопрос. Михаил Михайлович уже задавал подобный вопрос. Сила давления света мы не учитывали, она действительно мала.

При расчете плотности потока на частицу для направленной скорости ионов используется выражение подвижность, умноженная на напряженность поля. Да действительно, в диссертации написано так, но при расчетах мы использовали данные из книги МакДаниеля. В этой книге приведены данные, которые позволяют посмотреть динамику изменения скорости ионов от слабых полей к сильным, потому что в сильных скорость ионов пропорциональна не напряженности, а корню из напряженности.

В расчете плотности тока электронов на пылевую частицу введен коэффициент отражения не ясен чему он равен. Коэффициент отражения равен 1, да необходимо было это указать эту информацию в тексте диссертации.

При этом в выражении для плотности тока не учтены возможные процессы эмиссии.

Да в рамках наших расчетов мы не учитывали процессы эмиссии. Но в работах Молькова С.И. при исследовании влияния термоэмиссии, автоэлектронной эмиссии говорится о том, что при давлениях порядка 0.1 тора, то есть наши экспериментальные условия, термоэмиссия действительно играет большую роль и вносит вклад в заряд частицы. Если мы еще и используем OML модель, а в наших расчетах это действительно так, то важно учитывать тероавтоэмиссию, вторичную эмиссию и так далее. Это интересная тема для дальнейших исследований, но в рамках данной работы эти исследования не проводились.

Прошу прощения за опечатки, которые допущены в тексте диссертации, на которые было указано составившими отзывы на автореферат и в отзыве ведущей организации.

### **Председатель**

Спасибо, присаживайтесь, пожалуйста. А мы переходим к оппонентам. Насколько я понимаю первый по списку Сергей Алексеевич Майоров.

### **Майоров С.А.**

Согласно традиции я не буду излагать вводную часть, работа актуальна и все прочее. Перейду к замечаниям. По содержанию работы АА имеется ряд несущественных замечаний, вот некоторые из них в порядке появления.

1. На стр. 11 в непронумерованной формуле и пояснении к ней путаются понятия тока и потока. Это в общем-то часто делается всеми. Ток и поток все-таки отличаются.

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. Следующее замечание третье. Оно чуть более существенно. 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?

Еще у меня возникло замечание после вопросов Михаила Михайловича. Александра Александровна неоднократно говорила о том, что мА это очень мало и mW в смысле лазера тоже мало. Вот миллиампер если его перевести в более понятные величины  $10^{16}$  ударов в секунду это уже много. И если  $10^{16}$  раз стукнуть о катод ионом, то появится  $10^{16}$  частиц, а если у вас трубка литровая, то это означает что за 1 с у Вас будет появляться 0.1% распыленных атомов металла. Это уже много, потому что как показывает детальное моделирование, 0.1% атомов металла в неоне приводит к тому, что 90% ионов будет не ионы неона, а ионов металла. Это совсем уже другая физика, это уже будут ионы металла в несобственном газе с совершенно другими скоростями дрейфа, вейка. Почти тоже самое я могу сказать про милivatы. В самом деле это очень мало, но если их перевести в энергетику, то для данной разреженной среды тор и доли тора это будет очень много, что и демонстрируется в известных экспериментах, о которых Вы говорили с воздействием лазера. Вот, наверное, все.

Заключение: работа интересная, хорошая, получено много интересных результатов. За работой Александры Александровны я слежу довольно давно. Я очень хорошо знаю лабораторию, из которой она вышла. Это лаборатория Латуша Е. Л. и Сэм М. Ф. из РГУ. 30 лет назад мы с ними работали. Это хорошая славная лаборатория, имеющая хорошую историю, но в несколько другой области, в области лазерной физики. Работа заслуживает присуждения степени, я призываю голосовать «за».

### **Председатель**

Спасибо Сергей Алексеевич. Вопросы мы к оппоненту задавать не будем?

### **Майоров С.А.**

Пожалуйста, я могу ответить, если есть вопросы.

### **Председатель**

Уже нет спасибо. Пожалуйста, Александра Александровна.

### **Каргашева А.А.**

Спасибо за отзыв. Действительно на странице 11 в непрономерованной формуле путаются понятия токов и потоков. Имеются в виду токи на поверхности пылинки.

По второму замечанию. Наблюдается некоторая путаница со словом поверхность. Нужно было написать следующим образом: «Электроны и ионы поглощаются в том случае, если их траектории пересекают поверхность пылевой частицы или касаются ее».

По третьему замечанию В работах Цендина Л.Д. предполагается не малость количества упругих ударов, а малость потери энергии в упругих ударах. При высоком давлении упругие удары будут вносить большой энергетический вклад.

Что касается 4-го замечания. Да можно было бы провести соответствующие исследования, расчеты и сравнить их с данными представленными в моей работе, но это тема для дальнейших теоретических исследований. Могу также сказать, что в данных условиях использовался именно этот подход, так как давление у нас 0.2 тора и длина свободного пробега составляет порядка сантиметра, а радиус дебая 0,2 см.

В последнем замечании речь идет о рисунке, представленном на слайде. Те данные, о которых говорил Сергей Алексеевич, указаны в тексте диссертации, но в подписи к рисунку нужно указать и давление, и длину страты и заряд частицы. Было бы полезно приложить более полную информацию. Размер частицы 4 мкм, заряд  $1.4 \cdot 10^4$  согласно расчетам, период страты 2 см и падение потенциала на 1 длине страты это 8,8 эВ. У нас Р-страта, и мы берем 2 длины страты - это 17.7 эВ, что на 1.1 эВ превышает энергию возбуждения неона. Соответственно 1.1 эВ это потери в упругих ударах. Их малость очевидна.

По остальным замечаниям. Да, действительно, бомбардировка катода присутствует, и я знаю работы Сергея Алексеевича, в которых исследуются эти эффекты. Я читала Ваши работы с удовольствием, спасибо. Но в рамках данной работы мы предполагаем, что газ у нас чистый и примеси отсутствуют.

И с замечанием о силе давления света я согласна, нужно учитывать.

### **Председатель**

Второй оппонент Владимир Николаевич Очкин из ФИАНа.

### **Очкин В.Н.**

Здравствуйтесь. Я такой схемы придерживусь. Тут уже много что прозвучало и в виде отзывов и вопросов, и ответов и так далее. И я пробежусь по своему отзыву. И будучи человеком законопослушным, следуя правилам ВАК, замечания я все-таки зачитаю в таком виде, в котором они есть в отзыве.

Надо сказать, что пылевая плазма объект уже давно не новый. Только систематические исследования уже лет 30 как идут на эту тему. Надо сказать, что вот ИВТАН, группы Фортова В.Е., Петрова О.Ф. довольно сильно инициировали работы по всему миру по этому вопросу. Тематика сильно расплылась и много частных вопросов. Такое мое ощущение, это я вне отзыва говорю, что здесь должна наступить какая-то точка перегиба когда-нибудь. Мне кажется, что до тех пор, пока нет толком хорошего объяснения синергетики этой плазмы, то есть формирования кристаллов, до этих пор более частные вопросы будут изучаться. Вот в данной диссертации как раз и исследуется такой частный вопрос, но он важный. Кристалл это много частиц взаимодействующих, а надо начинать с того как ведет себя индивидуальная частица, и как она с плазмой взаимодействует. Вот

этому вопросу диссертация и посвящена. Похвально, что удалось так организовать эксперимент, что надежно вбрасывается единичная частичка, с другими она не взаимодействует, и можно чисто рассматривать взаимодействие плазмы и вот такого вот микроскопического объекта. Если говорить в целом про диссертацию то, здесь рассматриваются два взаимосвязанных вопроса. Первый - это физика плазмы и зарядка частицы. Поскольку много существует способов на сегодняшний день формирования пылевой плазмы, наиболее традиционный это вот в тлеющем разряде в стратах. Надо сказать, что Санкт-Петербургской школе, в которой Александра Александровна работу выполняла, есть очень хороший опыт работы с этими стратами. Собственно на этой основе в диссертации все строится. Много используется и из теоретического задела, и из экспериментальных возможностей. Поэтому совершенно логично, человеку пришедшему в эту группу заняться таким вопросом, и она успешно с ним справлялась. Я могу поставить в заслугу, что она очень хорошо использовала предыдущий опыт. Вот если взять трубку, там есть катод, а под катод подвели вот такую вот диафрагму интересную. Мы знаем, что существуют различного рода катодные неустойчивости, которые сказываются на стабильности разряда. Диафрагма демпфирует эти неустойчивости, это раз. И два, здесь по ходу дела прозвучали замечания, что распыление металла оно в конце концов может привести к тому, что ионизация пойдет по металлу, а не по инертному газу. Так вот наличие этой вставки, то есть сужения, оно забирает на себя распыленный металл и основная его доля в разряд не попадает. Интересно, что это идея уже около 70 лет. В 50-х годах предложил Клярфельд Б. Н. такую вот технологию. И вот понимание ситуации позволило диссертантке простым способом целый ряд побочных эффектов или устранить, или смягчить.

Ну а дальше по главам диссертация устроена таким образом. Первая глава это фактически есть литературный обзор. Литературный обзор, главным образом, посвящен самой плазме, формированию страт, влиянию эффектов нелокальности на формирование ФРЭ, потому что для того, чтобы посчитать, например, зарядку частиц надо же как же знать как устроена функция распределения электронов по скоростям. До последнего времени, в основном, брали не обязательно Максвелловское распределение, но рассчитанное в локальном приближении и обрезали его на величину потенциала, которое отсекает медленные электроны от процесса зарядки этой самой частицы. Такое приближение работает, но все скрипят, даже сами авторы, которые этим пользуются. Здесь все делается последовательно, совсем новых предложений нет, но по отношению к своим условиям здесь все сделано достаточно аккуратно. Это первая глава, а поскольку я обещал, я должен сказать какие у меня замечания есть к этой главе. Недостатки первой главы

- Ставится задача об исследовании частиц в Р-типа стратах. Выбор именно этого типа не обоснован; То есть такое впечатление, что было несколько человек: один исследовал Р-страты, другой S-страты, другой еще какие-то. Почему Р-страты не понятно.

- Идет постоянная путаница понятий о Максвелловском и равновесном распределении энергий электронов. Максвелловское всегда называется равновесным в тексте или, по крайней мере в большинстве случаев, что неправильно.

А собственно сами расчеты и методы расчета нелокальной функции распределения они описаны во второй главе. Причем сделано все достаточно аккуратно, последовательно и просчитаны аксиальные распределения функции распределения вдоль оси. Некоторые недостатки я сюда не включал, всего не учесть. Ко второй главе замечания следующие.

- Первое к названию главы. Она называется «Уединенная частица в стратифицированном разряде». Я считаю, что это совершенно не информативное название, это как журавль в небе ли еще что-то такое. В чем вопрос в этой главе совершенно не понятно. То есть название главы малоинформативное и не отражает цели.

- Еще одно замечание. Расчеты функции распределения проводились на основании результатов ранее проведенных в группе до нее в этом же газе. Собственно поэтому выбраны и эта трубка, и этот газ, и диапазон условий для того, чтобы воспользоваться ранее полученными экспериментальными результатами. Но дело в том, что не указаны не только погрешности измерений, ранее проведенных измерений, но и, соответственно, связанные с этим погрешности расчетов. На измерения расчеты опираются, используются как входные параметры результаты экспериментальных данных. И в этой ситуации говорить о различии зарядов частиц при разных функциях распределения по энергиям трудно. Тем более что находится, что в положении равновесия зарядовое число  $1,4 \cdot 10^4$ , это если функция распределения просчитана честно как нелокальная функция. А если по максвелловской такой функции считать, то будет  $1,53 \cdot 10^4$ . То есть разница всего 6-7 %, то есть на основании этого диссертант говорит, что вот видите какая разница. Если мы эти рисунки прорисуем с положением равновесия и ошибочку поставим, то там с выводами могут быть вопросы. Значимо то различие, не значимо, не понятно. И есть некоторые погрешности в ссылках, которые я указываю.

- И вот тоже нехорошо. В выводах говорится, что у нас в плазме зарядовое число частицы  $1,4$  и  $1,5 \cdot 10^4$ . При каких условиях: давления, токи? Как постоянная Планка.

И после того как выполнена часть работ связанная с выяснением зарядового числа частицы, как она заряжается, как она теряет заряд, вот эта кинетика рассматривается, дальше начинается работа по кинетике движения макрочастицы в этой самой плазме. Что вполне логично. И все последующие главы 3,4,5 они этому вопросу и посвящены. Колебания плазмы под действием возмущений тока, которые вызываются специальным модулятором тока с крутыми фронтами, вот анализируется колебательное движение частиц в условиях возмущения. В принципе, какая-то аналогия более ранних работ существует, в высокочастотных разрядах нечто подобное рассматривалось, но в данном случае все сделано остаточно независимо и неплохо. Вот замечания возникают.

- Я вот для увеселения ВАКа написал: «Вряд ли найдется читатель, которого не затруднит понимание намеченной задачи, сформулированной в первом вводном абзаце к главе – «В настоящей главе предлагается экспериментальный метод расчета заряда...» Причем это не опечатка, потому что на 15 строчках преамбулы это повторяется дважды, а то и трижды «экспериментальный метод расчета». Так, наверное, не надо писать.

- Еще замечание. Приводится формула Эпштейна. Она возникает непонятно откуда безо всяких ссылок, и никаких нет объяснений параметров, их размерностей и так далее.

- Дальше в тексте и выводах наблюдается путаница, иногда какие-то расхождения. Так в тексте, там указываются страницы, значения собственной частоты частицы вот под действием вот этих возмущений тока - 138 рад/с, коэффициент затухания бетта - 15 обратных секунд. Говорится, что эти значения относятся к давлению 0,06 тора. А в выводах это же значение затухания приписывается давлению 0,16 тора. Чему тогда приписать частоту 25 Гц, которая опять написана в выводах. Потому что если мы 138 поделим на 2 пи, то мы получим не 25, не 15, а 21. По-видимому из разных условий взяты вот эти данные, поэтому возникает некий сумбур.

- Ну и потом из неоткуда возникают картинки, на которых показано аксиальное распределение электрического поля и интенсивность, причём совершенно непонятно, что это светит. Неон это светит, какие линии неона? Причем совершенно не похоже, что автор это сама делала, потому что в экспериментальной установке нет ни зондов, ничего чем можно поля померить, ни спектральной аппаратуры, но ссылок не дано. Это небрежность, которая в диссертации не приветствуется.

Из этих колебаний собственные частоты вычислены, поэтому совершенно логично было бы посмотреть, как частица будет себя вести в режиме вынужденных колебаний. И вот 4 и 5 глава они относятся к исследованию режимов вынужденных колебаний частиц. Собственные колебания 1 раз возбудил, они быстренько затухают. Здесь периодически происходит возмущение и при этом измеряются АЧХ. В принципе сделано достаточно подробно, но однако замечания.

- Имеется путаница с рисунком. Я тут указываю, что ссылаются на рисунки в предыдущих главах, которых нет. В этой и предыдущей главе некоторые рисунки идентичны.

- Второе замечание связано с тем, что я действительно не очень понял парадигма: аппроксимация АЧХ предполагает некоторую подгонку параметров. Это как-то совершенно в диссертации не обсуждается. И кроме того, вызывает некое удивление, что из текста можно понять, что вот эти коэффициенты затухания и собственная частота все-таки при подгонке варьируются. А если они варьировались для достижения согласия с экспериментом, то в чем задача.

Следующая, 5-я глава, является продолжение предыдущей. Если вынужденные колебания, рассмотренные в 4-ой главе, я рассказал, как они достигаются, то в следующей главе был увеличен диапазон глубин модуляции этих возмущений, амплитуда этих возмущений. Проявились нелинейные эффекты, которые выразились в том, что появились дополнительные резонансы на АЧХ и наличие гистерезиса, то есть при увеличении и при уменьшении частоты колебаний идут немного разным образом, типа как фазовые переходы второго рода. Не буду подробно читать, но вот в замечаниях ко пятой главе следующие. Замечания по оформлению.

- Имеются некоторые повторы фрагментов предыдущих глав. Да формула такая-то это одно и тоже чем такая-то, рисунок такой-то.

- В ряде случаев, относящихся к теории осциллятора, не все входящие параметры определены. Не следует называть силой величину, имеющую размерность ускорения, иначе будет наблюдаться ералаш.

- И есть некоторые повторы в выводах.

Я подробно перечислил замечания, которые я озвучил по главам. Я сделал это специально для того, чтобы подчеркнуть, что все они существенные, с моей точки зрения, но они все частные: это относится к этому разделу, это относится к этому разделу. Они качественно совершенно разного смысла, некоторые по существу, некоторые скорее корреляционного характера. Это я специально стараюсь показать что они частные. Если перейти к общей оценке работы, то я заключаю, что в целом работа выполнена на достаточно высоком уровне. И очень хорошие публикации в журналах, которые имеют наивысшие рейтинги, то есть материал прорецензирован на высоком уровне, не только мной. Это о достоинствах работы. Два общих недостатка я все-таки должен отметить. Помимо тех частных, которые к разным разделам относятся, 2 общих недостатка такие:

1. Работа и по названию и по тексту претендует на исследования объекта в виде плазменно-пылевой системы. В названии вот есть такой термин «плазменно-пылевая система». Само понятие системы предполагает наличие взаимных связей отдельных ее составляющих. При расчетах электронной кинетики частица выступает как коллектор зарядов, отбираемых у плазмы, но обратное влияние не рассматривается. При рассмотрении колебаний используются уравнения движения частиц, в которых также не просматривается их влияние на свойства плазмы. В общем я бы не стал рассматривать вот этот объект как систему, некий вот такой зондик, частичка в плазме диагностирует то, что в плазме происходит. Но это замечание редакционно-методического характера.

2. Но вот более существенно и весьма досадно, что в работе совершенно не обсуждается, но сейчас в докладе некоторые такие попытки сделаны, погрешности результатов. И в ряде случаев не позволяет в должной мере оценить их ценности и надежности. Но вот уже примеры приводились. Например, если исследуется кинетика заряда на основе нелокальных уравнений Больцмана, то автор считает, что различие в 5, 6 процентов между Максвелловской функцией и нелокальной функцией это значимое отличие и она считает, что это существенно. А то что от эксперимента отличается на 30 процентов это вроде как хорошее совпадение. Поэтому с погрешностями здесь путаница. Резюмируя могу сказать, что несмотря на замечания, работа оставляет положительное впечатление. Полученные результаты, несомненно, будут востребованы и стимулируют постановку новых физических исследований.

Автореферат написан ясно и по содержанию адекватен диссертации.

Считаю, что представленная работа удовлетворяет существующим требованиям ВАК и дает основания для присуждения ее автору Карташевой Александре Александровне ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 «Физика плазмы»

**Председатель.**

Спасибо, Владимир Николаевич. Но я так понимаю, что Ваши слова относятся к работе с этим названием?

**Очкин В.Н.**

Да. Ну а что? У меня есть замечания к названию.

**Председатель**

Ну, я думаю, что после такого подробного рассмотрения вопросов к Вам вряд ли может быть. Если есть, то, пожалуйста. Спасибо, Владимир Николаевич.

**Очкин В.Н.**

Если я никого не спровоцировал.

**Председатель**

Александра Александровна, можно Вас попросить согласиться со всеми грамматическими и семантическими замечаниями, а ответить только на основные.

### **Карташева А.А.**

Большое спасибо за столь подробный анализ и внимательное прочтение моей диссертационной работы. Да, действительно, в тексте присутствуют опечатки и неверные ссылки на литературу и рисунки. Приношу свои извинения за сделанные ошибки и принимаю замечания оппонента.

Что касается основных замечаний. О стратах Р-типа вопрос уже был в отзыве на автореферат. Наши условия соответствуют стратам Р-типа. То есть у нас на двух длинах страт 17,7 Эв, что соответствует расчетам с учетом нелокальной кинетики электронов для страт Р-Типа. У Сергея Алексеевича также был вопрос начет сравнения с зондовыми измерениями электрического поля. Данная экспериментальная установка не позволила провести зондовые измерения вдоль страты, но были выбраны похожие экспериментальные условия, в которых под руководством Юрия Борисовича было промерено достаточно подробно распределение профиля поля вдоль страты. И поскольку условия близки, то мы выбрали заданный профиль поля, соответствующий этим измерениям, он представлен на слайде. Но в рамках данной работы зондовые измерения не проводились. Кроме того, отвечая на вопрос оппонента, так как функция распределения электронов сильно нелокальна, то она не испытывает значительного влияния со стороны структуры профиля поля. То есть некоторые неточности в определении профиля поля не вносят существенных изменений в вид функции распределения. Для сравнения на слайде представлена функция распределения для страт Р-типа, рассчитанная в другом поле синусоидального вида, но тоже с большой глубиной модуляции. Под глубиной модуляции я понимаю резкий спад профиля поля от 14 В/см до 2 В/см за 1 период страты. Мы видим, что качественно рисунки совпадают и функции распределения отличаются незначительным образом.

Всюду следует заменить термин «равновесная» на термин «локальная Максвелловская» функция распределения. В неравновесных условиях в принципе может сформироваться Максвелловская функция, при этом плазма разряда будет далека от равновесия.

Название главы малоинформативное и не отражает цели. Название главы было «Уединенная пылевая частица в стратифицированном разряде». В данной главе была исследована нелокальная кинетика электронов, рассмотрены виды страт при низких давлениях и токах, был рассчитан заряд уединенной пылевой частицы, как для нелокальной функции, так и для максвелловской, получены значения зарядового числа. В данном названии я попыталась обобщить все те эффекты и явления, описанные в данной главе. Действительно, можно было бы расширить это название, указав какие-то существенные особенности. Я принимаю замечание оппонента.

На слайде представлено распределение потенциала пылинки вдоль длины страты для нелокальной и для Максвелловской функций распределения. Действительно, значения зарядовых чисел действительно очень близки 1.4 и 1.5, но картинка отличается качественно. Мы видим, что распределения потенциалов находятся в противофазе. Устойчивое положение равновесия пылинки на профиле поля соответствует устойчивому положению при распределении потенциала, рассчитанного с помощью нелокальной функции. Градиент распределения потенциала, рассчитанного с помощью Максвелловского распределения, отличается от реального. Если использовать Максвелловскую функцию распределения, то знак производной заряда окажется таким, что положение пылинки будет неустойчивым. То есть малая флуктуация по координате приведет к тому, что возвращающая сила будет стремиться вывести пылинку из

устойчивого положения, то есть она упадет из страты. Если взять другой размер частицы, то есть соответственно другую массу, то пылевая частица попадет в другую фазу страты, и значения зарядов будут действительно сильно отличаться.

Говорится, что коэффициент затухания оказался на порядок меньше частоты. Действительно, нужно было ввести величины с одинаковыми размерностями. Собственная частота должна была быть представлена не в радианах на секунду, а в Герцах, также как коэффициент затухания. Тогда величины будут отличаться в 1,5 раза.

Формула Эпштейна без номера, без ссылки и не все величины определены. Формула Эпштейна в работе используется неоднократно, ссылка на работу Эпштейна присутствует в списке литературы. Все используемые параметры также введены в тексте диссертации. Но я согласна с оппонентом, что их нужно ввести именно там, где впервые вводится формула Эпштейна и еще раз конкретизировать те параметры, которые в нее входят

В тексте и в выводах наблюдается путаница

### **Председатель**

Давайте отнесем это к семантическим...

### **Карташева А.А.**

Хорошо.

Откуда у автора взято распределение поля (рис.3.7а) и интенсивности (непонятно чего, рис. 3.7б)?

На слайде представлено распределение свечения страт с пылинкой, заметный пик над профилем свечения – рассеянный пылинкой свет лазера. Далее представлено рассчитанное помощью нелокальной функции распределения количество возбуждений, которое и есть свечение. Эти графики скоррелированы с профилем поля. Для чего это сделано? С помощью эксперимента, то есть сфотографировав страту с пылинкой, мы можем определить на какой ветви профиля поля находится наша пылевая частица. Не следует этот метод использовать для точного определения положения равновесия пылинки, но мы смогли качественно доказать, что пылинка может удерживаться балансом сил только на анодной ветви профиля поля страты. Что это за распределение непонятно чего? Это интенсивность свечения страты. Мы рассчитали количество возбуждений с помощью нелокальной функции с учетом суммарного сечения возбуждений. То есть полное число неупругих ударов, приводящее к возбуждению все уровней неона, которые будут излучать, то есть на слайде представлено суммарное излучение, а не какого-то конкретного уровня. Это суммарная интенсивность была скоррелирована с интенсивностью свечения страты, не разложенного в спектр, которое получено с помощью оцифровки изображения. Далее количество возбуждение скоррелировано было с профилем поля. Почему важно это сделать? Если функция распределения Максвелловская, то количество возбуждений будет иметь тот же максимум, что и профиль поля. Но в случае нелокальной функции присутствует сдвиг фаз между профилем поля и количеством возбуждений. И только в этом случае пылинка попадает на устойчивую ветвь профиля поля. В одной из работ Юрия Борисовича было проведено экспериментальное и теоретическое исследование интенсивности свечения различных уровней неона (*график на слайде*). Мы видим, что все они имеют схожую структуру, поэтому и суммарная интенсивность будет иметь похожее распределение.

### **Председатель**

Мне кажется это почти все.

### **Карташева А.А.**

Я согласна со всеми замечаниями оппонента

### **Председатель**

Спасибо Александра Александровна.

У нас самое время для дискуссии. Пожалуйста, Олег Федорович.

### **Петров О.Ф.**

Уважаемые коллеги, я бы хотел воспользоваться удобным случаем. Я не буду особенно злоупотреблять вниманием аудитории, но все-таки немного злоупотреблю. Сегодня мы заслушали, в моем представлении, просто классическую работу по плазменно-пылевым системам. Я не боюсь этих сочетаний, я объясню почему. По состоянию на сегодняшний день то, что происходит с пылевыми частицами в газовом разряде постоянного тока является своеобразным hot-topics в этой науке. С чем это связано? Краткая справка. Если мы вернемся к новейшему периоду пылевой плазмы, его отсчет идет 1994 года. Сама история пылевой плазмы восходит еще к работам Ленгмюра, он наблюдал движение пылевых частиц в газовом разряде в ходе своих экспериментальных исследований. Это история ближе к столетнему юбилею уже. Олег Иванович Синовский с своё время нашел работу, выполненную в советском союзе, опубликованную в одном из советских журналов. Это работа 80-х годов о наблюдении пылевых структур в высокочастотном газом разряде. Могу сказать, что лет за десять до того как результаты были опубликованы таким группами как группы профессора Морфила, профессора Чу Линь, профессора Мельцера эта работа была сделана в Советском Союзе и есть документальное подтверждение. В чем оказался изъян? Он не привели фотографии и сочли это неким побочным эффектом, поэтому эта работа прошла малозаметно. Я сказал 1994 год, но отсчитывать надо лет на 10. Что за это время произошло? 1994 год - опубликование работ в ВЧ газовом разряде, 1995 г – термическая плазма атмосферного давления в ИВТАНе сделано, 1996 г - опять-таки в ИВТАНе были сделаны работы по наблюдению структур в газовом разряд постоянного тока. Здесь стоит отметить работы профессора Сато, к сожалению, он ушел из жизни несколько лет назад., он тоже работал с газовым разрядом постоянного тока. Что за эти 25 лет произошло? Долгое время пылевую плазму рассматривали как привычную газовую плазму, но в которой ионы-частицы, имеют необычайно большую массу. Этот подход проходит через огромное количество работ, поэтому в этой науке, по моим представлениям, произошел бум. Туда бросились все, кто хорошо ориентировался, разубирался, имел опыт в низкотемпературной плазме. Казалось бы, все просто возьмем наши уравнения, подходы и получим новые результаты. Пылевая плазма рассматривалась как обычная плазма, увеличенная на несколько порядков. Все что раньше нужно было исследовать изощрёнными методами, сейчас можно было увидеть практически невооруженным глазом. Жизнь экспериментальная и вообще природа устроена так, чтобы человек не зазнался. Прошедшие годы показали, что плазменно-пылевая система в газовых разрядах низкого давления не является ни системой тяжелых ионов, ни системами, которые можно описывать в рамках равновесного или квазиравновесного подходов. Здесь только несколько примеров. Если мы берем

классическую термодинамику, то понижение температур в такой системе приводит к возникновению структур. Почему? Потому что при уменьшении температуры внутренняя энергия играет все большую и большую роль, то есть должно идти образование пылевых структур. Что происходит в пылевой плазме в газовом разряде постоянного тока? Энергия пылевых частиц при понижении температуры нарастает. Это всего лишь один из фактов, который заставляет задуматься. Почему слова плазменно-пылевые системы? Потому что самая адекватная модель на сегодняшний день, которая описывает такую систему это модель открытых диссипативных структур. Это означает, что взаимодействие частицы с окружающей средой - это обмен массой и энергией. Если мы возьмем частицу и поместим ее в разряд, она будет заряжаться потоками ионов и электронов, то есть идет рекомбинация на частицу, энергия частиц отличается от окружающей среды. Возникает вопрос, как описать такую систему? Возникло очевидное предположение – броуновская частица. Первые эксперименты с броуновской частицей подтвердили атомно-молекулярную теорию. В данном случае мы часто сталкиваемся с тем, что энергия частиц порядка нескольких эВ. А нейтралы имеют энергию порядка комнатной температуры, 1/40 эВ. Когда возникло такое предположение, я попытался найти, а какую модель можно использовать. К своему удивлению нашел, что это модель называется модель активных броуновских частиц. По довольно случайному стечению обстоятельств она развивалась и возникла примерно в тоже самое время, что и плазменно-пылевые структуры в газовых разрядах. Это модель броуновской частицы, в которой есть механизм преобразования внутренней энергии в энергию ее движения. Это означает, что это модель открытой частицы, открытой системы. И когда мы попытались эту модель использовать, то возник вопрос, как можно эту систему контролировать? И вот тогда вспомнили про термодинамику, которую развивал наш соотечественник Илья Пригожин. Вспомнили про диссипативные структуры. Оказалось, что эта система не является просто неравновесной. Это система стационарная, сильнонеравновесная. Если приводить пример стационарной неравновесной системы, то это системы живые. Они не стремятся к равновесию. Если они приходят к равновесию, то это называется смертью. Пылевая система, именно плазменно-пылевая система, так как нельзя взять эту частицу и вырвать ее. Это пример открытой диссипативной структуры. Более того в таких системах есть способность к самоорганизации, почему Пригожин ввел понятие диссипативных структур? Это означает, что при определенных условиях эта система может двигаться, уменьшая энтропию внутри себя. Это означает, что система эволюционирует как ни странно по Дарвину. И слово эволюция оно тоже универсально, по Дарвину значит от менее сложных к более сложным. Если вы нашли этот способ, то вы можете поставить такие эксперименты и попытаться здесь продвинуться. Чем ценна сегодняшняя работа? Тем, что здесь изучается свойство отдельных частиц. А сейчас мы пришли к тому, что формирование структур играют те факторы и мелочи, от которых раньше отмахивались. Например, какой заряд частицы, что на этот заряд влияет. Какая форма частицы, а какая там эрозия с поверхности частицы. Эрозия означает, что меняется состав ионов, и более того возникает в разрядах постоянного тока такой механизм как ионная фокусировка. Это означает, что возникает механизм для формирования анизотропных структур, называемых цепочка. С этой точки зрения эта работа действительно классика. Здесь описаны свойства частицы, причем эта частица взаимодействует с окружающей средой. Если вы переместили плазму из точки а в точку б, то система уже изменилась. В этом смысле работа является просто бесценной, потому что результаты эти получены экспериментально, и получены в сложных

экспериментальных условиях. Я не сказал, но когда мы попытались анализировать такую систему еще в 90 годах, мы как раз работы Юрия Борисовича по бегущим стратам и нашли, и это был первый шаг к пониманию. Вот сейчас мы идем все вместе в одном направлении. Термодинамика для описания самоорганизации, куда попадают и живые системы, это чем начинали заниматься еще в прошлом веке и продолжают до сих пор. Там много нерешенных задач и по сей день, в том числе, как из простых систем возникают чрезвычайно сложные. Сегодняшняя термодинамика живых систем это термодинамика возникновения жизни. В этом смысле работа, где изучается зарядка частиц в стратах, это работа сама по себе является уникальной. Я думаю, что после моего продолжительного выступления не надо делать вывод поддерживать работу или нет, все очевидно.

### **Председатель**

Спасибо, Олег Федорович. Я думаю, что после этого выступления мы можем дискуссию прекратить, поскольку оценка диссертации с таким названием, мне кажется, ясна. Александра Александровна, хотите что-нибудь сказать в заключение?

### **Каргашева А.А.**

Я бы хотела поблагодарить членов диссертационного совета за возможность доложить результаты исследования, которое я провела в рамках своего обучения в аспирантуре. Кроме того, я бы хотела поблагодарить моего научного руководителя профессора Юрия Борисовича Голубовского за предоставление интересной темы для исследования. Также хотела поблагодарить Карасева Виктора Юрьевича за возможность провести эксперимент. Также хочу поблагодарить кафедру оптики, которая способствовала проведению и экспериментальной работы, и теоретических расчетов.

И в заключении хотела бы еще раз вернуться к актуальности данной работы. Вопрос уже был задан, но я бы хотела еще сказать следующее. Нелокальная функция распределения в наших работах была впервые использована для расчетов, которые доведены до конца. Ранее этим занимался Сухини Г. И., но именно окончательное значение заряда уединённой пылевой частицы получено в наших работах. Самое главное, что мы сумели получить и исследовать свойства уединенной пылинки. Не так как в работе Мельцера, где тоже исследованы нелинейные колебания. В его работах рассматриваются колебания 1 пылинки из цепочки частиц, либо из объемной пылевой структуры. То есть в этих работах нельзя не учитывать влияние других частиц на уединенную пылинку, в отличие от наших исследований. Большое спасибо за внимание.

### **Председатель**

Самое время перейти в голосованию, для чего нам нужна счётная комиссия. Поступило предложение предложить проверенных членов счетной комиссии. Это Виктор Владимирович голуб, Александр Владимирович Еремин и Лев Гаврилович Дьячков. *(Счётная комиссия выбирается единогласно)*. Тогда прошу счётную комиссию приступить, а всех членов диссертационного совета проголосовать. *(Проводится процедура тайного голосования)*.

### **Председатель**

Уважаемые члены Совета! Давайте послушаем результаты.

## Голуб В.В.

Уважаемые члены Совета! Позвольте огласить протокол заседания комиссии. Состав диссертационного совета утвержден в количестве **31** человека. Дополнительно введены члены совета – **нет**. Присутствовало на заседании **22** членов совета, в том числе, докторов наук по профилю рассматриваемой специальности – **11**. Роздано бюллетеней – **22**, осталось не роздано – **9**, оказалось в урне бюллетеней – **22**.

Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Князеву Дмитрию Владимировичу:

**за – 22, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.**

## Председатель

Спасибо. Утверждаем прежде всего. Кто за? Против нет? Воздержавшихся нет? (*Протокол счетной комиссии утвержден единогласно*).

Тогда мы Вас, поздравляем.

Переходим к обсуждению проекта заключения. Есть замечания, пожелания? (*Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения*). Если больше нет желающих обсуждать проект, тогда мы должны его проголосовать с теми замечаниями, которые мы только что обсудили. Кто за? Спасибо. Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Спасибо, принято единогласно.

(*Проект заключения принят единогласно*).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 27.03.2019г. протокол № 3

О присуждении Карташевой Александре Александровне, гражданке Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Колебательные свойства плазменно-пылевой системы в стратифицированном разряде», в виде рукописи по специальности 01.04.08 – физика плазмы, принята к защите 26.12.2018г. (протокол заседания № 26), диссертационным советом Д 002.110.02 созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2, iht.ru, (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Карташева Александра Александровна 1990 года рождения, в 2013 году окончила Федеральное Государственное Автономное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Южный Федеральный Университет».

В 2018 году окончила очную аспирантуру Федерального Государственного Бюджетного Образовательного Учреждение Высшего Образования Санкт-Петербургского Государственного Университета.

Диссертация выполнена на кафедре общей физики - 1 ФГБОУ ВО СПбГУ.

Работает инженером-исследователем на кафедре общей физики - 1 ФГБОУ ВО СПбГУ.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Голубовский Юрий Борисович профессор кафедры оптики ФГБОУ ВО СПбГУ.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Очкин Владимир Николаевич, главный научный сотрудник отделения оптики Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки «Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук», заведующий кафедрой;

доктор физико-математических наук, доцент Майоров Сергей Алексеевич, ведущий научный сотрудник теоретического отдела Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Петрозаводский государственный университет» г. Петрозаводск, в своем положительном заключении, составленном профессором кафедры электроники и электроэнергетики ПетрГУ, доктором физико-математических наук, доцентом Мольковым С.И. (утвержденном проректором по научной работе д.т.н. профессором Сяунёвым В.С.), указала что:

1. Получено значение заряда уединенной пылевой частицы  $Z_d = 1.47 \cdot 10^4$  с учетом нелокальной кинетики электронов в стратифицированном разряде низкого давления в неоне. Проведено сравнение распределений потенциала и зарядового числа пылинки вдоль страты, полученных с учетом нелокальной функции распределения и Максвелловской ФРЭ. Показано, к каким ошибкам может привести использование равновесной ФРЭ при расчете заряда пылевой частицы.

2. Разработан и реализован метод определения заряда уединенной пылевой частицы на основе релаксационных колебаний.

3. Исследованы линейные резонансные свойства колебательной системы страта-уединенная пылевая частица. Впервые получено значение добротности плазменно-пылевой системы, которое составило величину порядка нескольких единиц.

4. Измерены нелинейные эффекты колебаний пылинки: незохронность, резонанс на удвоенной частоте, гистерезис. Количественное описание измеренных АЧХ проведено на основе теории ангармонического осциллятора.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 3 статьях в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, более 10 тезисов в сборниках трудов конференций.

Основные работы:

1. Golubovskii Y., Karasev V., Kartasheva A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. P. 115003.

2. Kartasheva A., Golubovskii Y., Karasev V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. Vol. 46. P. 723–726.

3. Golubovskii Y., Karasev V., Kartasheva A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. P. 065006.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск** (главный научный сотрудник лаборатории 4.1 ИТ СО РАН, профессор каф. физики неравновесных процессов, д.ф.-м.н., Сухинин Г.И.) – отзыв положительный, с вопросами:

1. В работе использовались частицы только одного размера (заряда),  $d = 4 \mu\text{м}$ . Почему не использовались частиц с другим диаметром? Это позволило бы усилить результаты по теории колебаний.

2. Добротность рассмотренных колебаний оказалась порядка  $Q \approx 5$ , что свидетельствует о достаточно сильной диссипации. Уменьшение размера частиц приведет к уменьшению силы трения Эпштейна и увеличению добротности рассматриваемых колебаний.

3. Следовало бы указать точность, с какой точностью можно определить электрическое поле по измеренным характеристикам колебаний пылевых частиц, и в какой области страт это возможно сделать.

4. Встречаются описки. Например, в формуле (2), стр.13 следует собственную частоту  $\omega_0$  возвести в квадрат:  $\omega_0^2 = qE'(z_0) / M_d$ .

**2. Московский Государственный Университет им. Ломоносова, г. Москва** (ведущий научный сотрудник каф. физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ, д.ф.-м.н., доцент Швилкин Б.Н.) - отзыв положительный, с замечаниями:

1. Некоторая незавершенность в интерпретации полученных автором резонансных кривых, в чем признается и сам автор на странице 20.

2. Не приводятся четких указаний на условия возбуждения релаксационных колебаний.

3. В тексте встречаются повторы, например, в самом начале главы четвертой и пятой автореферата.

4. Приводятся разные данные о верхнем диапазоне давлений неона 0.4 торр (стр. 12) и 0.66 торр (стр.14).

**3. Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва** (главный научный сотрудник лаборатории №1.2.1.1 Научно-исследовательского центра теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур, д.ф.-м.н., Жуховицкий Д.И.) - отзыв положительный, без замечаний.

**4. ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Троицк** (ведущий научный сотрудник Центра Теоретической физики и Вычислительной математики ГНЦ РФ ТРИНИТИ Госкорпорации «Росатом» к.ф.-м.н. Кочетов И. В.) - отзыв положительный, с замечанием:

При сравнении зависимости расчетных средних энергий электронов и их концентраций вдоль стратифицированного разряда при использовании Максвелловской локальной ФРЭЭ и полученной из численного решения нелокального уравнения Больцмана представляет еще и интерес сравнение с расчетами, полученными при использовании локального уравнения Больцмана для ФРЭЭ.

**5. Ухтинский Государственный технический университет, г. Ухта** (заведующий каф. физики УГТУ д.ф.-м.н., профессор Некучаев В.О.) - отзыв положительный, с замечанием:

В работе используются прямоугольные импульсы модуляции тока, тогда как в теории ангармонического осциллятора предполагается синусоидальная модуляция.

**6. Государственный Университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург** (профессор каф. физики ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, д.ф.-м.н. Полищук В.А.) - отзыв положительный, без замечаний.

**7. Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону** (профессор физического факультета ФГАОУ ВО ЮФУ, д.ф.-м.н. Иванов И.Г.) - отзыв положительный, с замечаниями:

1. не обосновывается выбор для исследования именно R-страт, и интересно, можно ли применить выводы работы к R-стратам.

2. Известно, что аэрозольные частицы собирают на своей поверхности электроны, что увеличивает напряженность эл.поля ПС и изменяет параметры страт, поэтому интересно, чем автор объясняет выбор в качестве пылевых частиц именно меламин-формальдегида, а также, как размеры частиц могут повлиять на результаты эксперимента.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- д.ф.-м.н., профессор Очкин В.Н. является ведущим ученым в областях физико-химической кинетики газового разряда в активных средах, классической и лазерной (линейная и нелинейная) спектроскопии неравновесной плазмы

1. Kostenko A. S., Ochkin V. N., Tskhai S. N. The influence of dust particles on the intensities of plasma emission lines //Technical Physics Letters. – 2016. – V. 42. – N. 7. – P. 743-746.

2. Bernatskiy A. V., Kochetov I. V., Ochkin V. N. Transformations of neutral particles in the discharge plasma in inert gases with water vapor and deuterium //Physics of Plasmas. – 2018. – V. 25. – N. 8. – P. 083517.;

3. Bernatskiy A. V., Ochkin V. N., Afonin O. N., and Antipenkov A. B. Measurements of the number density of water molecules in plasma by using a combined spectral– probe method //Plasma Physics Reports. – 2015. – V. 41. – N. 9. – P. 705-714.

- д.ф.-м.н., профессор Майоров С.А. является признанным специалистом в области низкотемпературной и комплексной плазмы

1. Maiorov S. A., Kodanova S. K., Golyatina R. I., and Ramazanov T. S. Kinetic characteristics of ions in the gas discharge and on the target surface //Physics of Plasmas. – 2017. – V. 24. – N. 6. – P. 063502.

2. Kodanova S. K., Bastykova N. K., Ramazanov T. S., Nigmatova G. N., and Maiorov S. A. The Effect of Magnetic Field on Dust Dynamic in the Edge Fusion Plasma //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – V. 46. – N. 4. – P. 832-834.

3. Golyatina R. I., Maiorov S. A. Characteristics of Electron Drift in an Ar–Hg Mixture //Plasma Physics Reports. – 2018. – V. 44. – P. 453-457.

Выбор Петрозаводского государственного университета в качестве ведущей организации обусловлен тем, что ПетрГУ является многопрофильной организацией, проводящей обширные исследования низкотемпературной плазмы по таким направлениям, как нано- и микроструктуры, плазменные кристаллы, модификация в плазме. генераторы плазмы, в том числе в области материаловедения.

Prokhorova E. I., Platonov A. A., Slyshov A. G., and Nazarov A. I. Experimental research of the cathode region of the glow discharge in nitrogen //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – V. 1058. – N. 1. – P. 012030

Prokhorova E. I., Kudryavtsev A. A., Platonov A. A., and Slyshov A. G. Correlation between reversion of signs of the electric field in the near-cathode plasma and anode fall potential in a short DC glow discharge //Technical Physics. – 2017. – V. 62. – N. 7. –P. 1122-1125.

3. Мольков С. И., Савин В. Н. Механизмы зарядки пылевых частиц в плазме с учетом эмиссионных процессов //Физика плазмы. – 2017. – Т. 43. – №. 2. – С. 193-202.

Диссертационный совет отмечает, что **на основании выполненных соискателем исследований:**

Вычислены потоки ионов и электронов на поверхность пылевой частицы и впервые получено значение заряда уединенной пылевой частицы с учетом нелокальной кинетики электронов в стратифицированном тлеющем разряде низкого давления в неоне. Проведено сравнение распределений потенциала и зарядового числа пылинки вдоль страты, полученных с учетом нелокальной функции распределения и Максвелловской ФРЭ. Показано, к каким ошибкам может привести использование равновесной ФРЭ при расчете заряда пылевой частицы.

Разработан и реализован метод определения заряда пылевой частицы на основе релаксационных колебаний. Величина измеренного заряда согласуется со значением, рассчитанным с учетом нелокальной кинетики электронов.

Получены резонансные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) вынужденных колебаний уединенной пылевой частицы диаметром 4 мкм в диапазоне давлений  $p=0.06-0.66$  торр. Исследована зависимость вида АЧХ от формы модулирующего сигнала. Значение собственной частоты плазменно-пылевой системы было определено двумя независимыми экспериментальными методами, основанными на измерении резонанса скорости и фазового сдвига между колебаниями пылевой частицы и вынуждающей силы. Полученное значение добротности плазменно-пылевой системы составило нескольких единиц.

Измерены нелинейные эффекты колебаний пылинки: незохронность, резонанс на удвоенной частоте, гистерезис и проведено их количественное описание на основе теории ангармонического осциллятора. С помощью полученных значений коэффициентов ангармоничности вычислена потенциальная энергия уединенной пылевой частицы в стратифицированном разряде

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

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 тлеющем 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 ключевого параметра пылевой плазмы - заряда пылинки - может привести использование равновесной (Максвелловской) ФРЭ.

Исследование степени диссипации плазменно-пылевой системы, проведенное с помощью амплитудно-частотных характеристик вынужденных колебаний пылинки, важно для понимания процессов перекачки энергии в плазменно-пылевой системе, установления физических причин существования коэффициента добротности и нелинейных эффектов вынужденных колебаний, а также механизмов процессов самоорганизации пылевой компоненты.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

- Разработан метод определения заряда уединенной пылевой частицы основанный на исследовании релаксационных колебаний частицы, вызванных переключением разрядного тока импульсами с коротким фронтом.
- Использованная 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 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 и физики комплексной плазмы в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» и других учебных организациях

**Оценка достоверности результатов** исследования выявила:

- результаты получены на сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследования;
- расчетно-теоретические исследования построены на известных, проверяемых данных, фактах, общепризнанных законах технической термодинамики, физической химии и теплофизики. Они согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;
- идея диссертационной работы базируется на анализе научно-технической литературы по предметной области исследования, обобщении передового опыта работы других научных групп, лабораторий и технологических компаний;
- установлено качественное совпадение авторских результатов и представлений с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;

**Личный вклад соискателя** состоит в проведении экспериментов и теоретических расчетов. Автором создан модулятор разрядного тока, разработан и реализован метод измерения амплитуды колебаний уединенной пылевой частицы в стратифицированном

разряде. Экспериментальные результаты получены и проанализированы автором также самостоятельно. Написание статей и тезисов докладов на конференциях осуществлялось совместно с соавторами при определяющем вкладе автора диссертации.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 27.03.2019г. диссертационный совет принял решение присудить Карташевой А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 11 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 9 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 22, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02  
д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02  
д.ф.-м.н.

Васильев М.М.

27.03.2019г.

