

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Карташевой Александры Александровны

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

В работе рассматриваются параметры единичной пылевой диэлектрической частицы в ионизованном газе и ее реакция на внешние возмущения. Это важные, хотя и частные вопросы, относящиеся к многолетнему (систематически – с 1990-х годов) циклу работ многих групп. Такой интерес связан с тем, что частицы приобретают большой заряд. В целом, плазма становится сильно неидеальной и это отдельный большой вопрос для теории. До сих пор не решен один из интересных сопутствующих вопросов о механизме самоорганизации упорядоченных пылевых облаков (кристаллов). Свойства уединенной частицы, и, в первую очередь, ее способность аккумулировать заряд, извлекая его из плазмы, естественно, лежат в основе других исследований.

Диссертант акцентирует внимание на двух взаимно связанных вопросах. Первый состоит в выяснении физического механизма доставки электронов из газовой фазы плазмы на частицу и их удержания. Второй – движение пылевой частицы при изменении макроскопических характеристик плазмы. Этим и определяется структура рукописи.

К настоящему времени поведение пылевых заряженных частиц исследовалось во многих экспериментальных условиях. Это и электронные и ионные пучки, слои емкостного ВЧ разряда, эксперименты в космической невесомости, квадрупольные ловушки типа Пауля и др. Диссертант выбирает наиболее традиционный путь – применение вертикального газового разряда, где вес частицы компенсируется электрическими силами в неоднородностях (стратах) положительного столба. Это одновременно и продолжение исследований группы СПбГУ, где работа выполнялась и возможность использования имеющегося оборудования и теоретических наработок. Эта ситуация и план собственных исследований изложены во **введении**. Здесь же, в соответствии с правилами ВАК, аргументируется актуальность исследований, их цель и новизна, защищаемые положения, приводится перечень публикаций (соответствует требованиям ВАК (2 из трех публикаций из квартили Q1 WoS). По докладам видно, что работа хорошо апробирована.

Рассмотрим вначале работу по ее разделам, отмечая замечания и вопросы к каждому из них.

Выделению новых моментов в данном направлении посвящена **первая глава диссертации**. Здесь в виде литературного обзора более детально описывается ситуация с состоянием указанных выше вопросов. Отмечается, что уже достаточно подробно развитые представления о нелокальности электронной компоненты плазмы широко используются для описания разрядов пониженного давления. Однако, непосредственно к задаче о зарядке частиц они не применялись и это может являться источником

некорректности результатов, получаемых при решении этой задачи приближенными методами. Практически не изучена динамика движения частиц в стратах при флуктуациях плотности электронов (тока разряда). Намечены пути расчетов и экспериментов. Рассматриваются известные типы страт в разряде в неоне, с которым планируются эксперименты.

Недостатки первой главы:

– ставится задача об исследовании частиц в Р-типа стратах. Выбор именно этого типа не обоснован;

-идет постоянная путаница понятий о Максвелловском и равновесном распределениях энергий электронов. Это не одно и то же.

Методы и результаты расчетов нелокальных функций распределений электронов по энергиям (ФРЭЭ) описаны во **второй главе**. Показано, что нелокальная ФРЭЭ существенно отличается от Максвелловской. Рассчитаны плотности электронного и ионного тока в зависимости от потенциала пылинки вдоль страты. Продемонстрировано влияние вида ФРЭЭ на распределение электронного тока. Рассчитано распределение потенциала и зарядового числа пылинки вдоль страты для нелокальной и Максвелловской ФРЭЭ. Показано, что использование Максвелловской функции может привести к ошибкам в определении заряда, получено значение заряда уединенной частицы.

Замечания ко второй главе:

- название главы мало информативно, оно не отражает цели;

- расчеты ФРЭЭ проводятся на основании результатов ранее проведенных в группе измерений структуры аксиального электрического поля в стратифицированном разряде в неоне. Не указаны не только погрешности измерений и связанные с ними погрешности расчетов, но и условия измерений. В этой ситуации говорить о различии зарядов частиц при разных функциях трудно. Тем более, что в положении равновесия указывается зарядовое число $Z=1.4 \cdot 10^4$ при расчете с нелокальной функцией и $Z=1.5 \cdot 10^4$ при расчете с максвелловской функцией. Различие (6-7)%. А на рис.2.7 в крупном масштабе графически и этого различия не видно;

- ссылка [92] не верна;

- в выводах к главе не указано, к каким условиям в разряде (геометрия, ток, давление, номер страты...) относятся перечисленные результаты.

Вопросы, связанные с динамикой движения пылевых частиц вынесены в 3 – 5 главы.

В **третьей главе** исследуются затухающие колебания частиц, равновесное положение которых возмущается изменяющимся током в форме меандра с коротким фронтом модуляции (частота модуляции 1-2Гц, глубина 0.3-0.4). По существу решается, как и в предыдущей главе, но другим методом, задача определения заряда частицы. В данном случае фиксируются релаксационные колебания частицы после резкого изменения места равновесного положения. Подход очевиден - кривая аппроксимируется формулой для затухающего осциллятора, откуда находятся частота и затухание, а из уравнения движения – заряд частицы. В принципе, весьма похожий подход использовался 20 лет назад [70], но в ВЧ разряде и для группы частиц.

Для данных измерений диссертантом собрана установка на основе газоразрядной трубки и стандартной регистрирующей аппаратуры. Как положительный момент, я бы отметил, что диссертант вспомнил и использовал давний опыт ([99], 1952г) стабилизации и управления положением страт с помощью подвижной диафрагмы у катода.

Полученные значения зарядового числа $Z=1.9 \cdot 10^4$ с точностью около 35% совпадают с результатом кинетического расчета, проведенного в предыдущей главе (вспомним, что там значимым считалось расхождение 6-7%, см. выше).

Замечания к третьей главе:

- *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...». Это не описка, поскольку на 10 строках встречается дважды;*

- *говорится, что «Коэффициент затухания оказался на порядок меньше частоты...». Ведь это же величины разной размерности!*

- *приводится «формула Эштейна» (без номера и без ссылки. В ней не все величины и их размерности определены);*

- *в тексте и в выводах наблюдается путаница. Так, в тексте (с.47) значения $\omega=138\text{рад/с}$ и $\beta=15\text{с}^{-1}$ относятся к давлению $p=0.06$ Торр. В выводах это же значение β предписывается давлению 0.16Торр. К чему тогда приписать частоту $\nu=25\text{Гц}$ (в выводах), если $138/2\pi=21.97\text{Гц}$?*

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

Поскольку область частот собственных релаксационных колебаний частицы в третьей главе оценена, естественным продолжением работы было бы исследование вынужденных колебаний в этом же диапазоне частот. Это и исследуется **в четвертой главе**.

Используя модуляцию тока на разных частотах, снимаются АЧХ движения пылинки и при малых давлениях наблюдаются резонансы. Экспериментальные данные по АЧХ моделируются решениями уравнения осциллятора при синусоидальной и прямоугольной формами. Естественно, ближе к эксперименту случай с прямоугольной формой, потому что так и устроен модулятор тока – в этом случае наблюдается возбуждение колебаний набором Фурье-гармоник тока. За счет подгонки параметров аппроксимационные и экспериментальные кривые удается довольно неплохо согласовать.

Замечания к четвертой главе:

Имеется путаница с рисунками. Рисунок 4.1 в Гл.2 нет (с.54). Фотографии на рис. 4.1 и 3.3 идентичны.

-*Аппроксимация АЧХ предполагает некоторую подгонку параметров. Фактически их в формулах (4.4), (4.5) как свободных нет. Параметры θ , ω_0 – скважность импульсов и собственная частота. Имеется коэффициент затухания β , но он определяется давлением газа. Вызывает поэтому некоторое удивление, что кривые АЧХ весьма близки*

для сильно различающихся давлений (рис.4.6 и утверждение после него). Из текста (с.с.60-61) можно так понять, что β и ω_0 все-таки варьировались. На каком, собственно, основании? Если подгонять ω_0 , то в чем задача?

Пятая глава является продолжением предыдущей. В определенной части этому же предшествовали работы [76,77] [2000 год], в которых отмечались признаки нелинейности колебаний пылинок в поле ВЧ разряда.

В техническом отношении по сравнению с четвертой главой несколько расширен диапазон модуляции тока (1-50)Гц и варьировалась глубина модуляции $0.13 < \mu < 0.41$ (в четвертой главе $\mu=0.23$). Изучаются АЧХ при разных μ .

При расширении диапазона частот модуляции основным наблюдением можно считать обнаружение дополнительного резонанса на АПЧ. При $\mu=0.18$. Пик резонанса находится около 40Гц, т.е. примерно вдвое больше частоты основного резонанса. И основной и дополнительный резонансы асимметричны, с оттенением в область больших частот. В принципе, такая асимметрия основного резонанса встречается и в Гл.4, но там на этом внимание не акцентировалось. Как новый результат автор отмечает и появление резонансов на субгармониках, но это также описывалось и в Гл.4.

Второе наблюдение, заслуживающее внимания – обнаружение гистерезиса при увеличении-уменьшении частоты модуляции.

Обнаружение других эффектов на которые указывает диссертант в разделах «неизохронность», «гистерезис», на мой взгляд, сомнительно. Для «неизохронности» и сдвига резонансов явно не хватает оценки погрешностей (отсутствует). По той же причине «оттенение» резонансов может быть охарактеризовано и «красным» и «синим» и никаким (рис. 5.2-5.4).

Для описания наблюдаемых эффектов используется модель ангармонического осциллятора с вынуждающей силой (5.2). Путем подгонки параметров в выражении для амплитуды резонансов удается неплохо описать АЧХ в области резонансов на основной частоте и для субгармоник. Несколько хуже удается аппроксимация для резонанса на удвоенной частоте. Не удовлетворительны, с моей точки зрения, результаты моделирования гистерезиса.

Для аппроксимации АЧХ диссертантом были подобраны константы ангармоничности частицы-осциллятора. Поскольку и ангармоничность и нелинейность являются следствием особенностей распределения потенциала, в последней части пятой главы проведено восстановление формы асимметричной потенциальной ямы в окрестности устойчивого положения частицы в страте.

Замечания к пятой главе.

- имеются повторы фрагментов предыдущих глав. Так, формула (5.1) – то же, что и (4.2). Рис.5.1 ничего нового не демонстрирует по сравнению с уже дважды показывавшимися рисункам 3.3 и 4.1.

- в ряде формул, относящихся к теории осциллятора не все входящие в них параметры определены. Не следовало бы называть силой величину, имеющую размерность ускорения (с.76);

- выводы 5 и 6 вполне аналогичны и могли бы быть объединены.

Общая оценка работы.

В целом, работа выполнена на достаточно высоком уровне. Выполнены уникальные эксперименты с уединенными макроскопическими частицами в стратифицированном разряде, предложены модели, описывающие наблюдения.

Как квалификационная, работа вполне соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям. Работа имеет установленную ВАК структуру. Ее отдельные части доведены до логически завершенных результатов. Работа актуальна, в ней получен ряд новых и практически значимых результатов. Эти результаты апробированы на многих конференциях и семинарах. Основные из них опубликованы в журнале с наивысшим на сегодня международным рейтингом.

Я специально отметил большое количество разного рода замечаний. Чтобы подчеркнуть их частный характер, я отнес их к различным главам. Они, на мой взгляд, существенны, но не подвергают сомнению основных результатов и выводов работы.

Среди общих, укажу на два недостатка.

1. Работа и по названию и по тексту претендует на исследования объекта в виде плазменно-пылевой системы. Однако, для этого, на мой взгляд, оснований недостаточно. 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. Это замечание редакционно-методического характера. Оно не умаляет проделанной работы.

2. Весьма досадно, что в работе совершенно не обсуждаются погрешности результатов. В ряде случаев это не позволяет в должной мере оценить их ценность и надежность.

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»

Отзыв составил Высококвалифицированный Главный научный сотрудник Отдела оптики низкотемпературной плазмы ФИАН д.ф.м.н., профессор Очкин Владимир Николаевич.

119991 Москва, Ленинский проспект, д.53. (499) 1326940, ochkinvn@lebedev.ru

Заместитель директора ФИАН д.ф.м.н.

Савинов С.Ю.

119991 Москва, Ленинский проспект, д.53. (499) 1326722 savinov@lebedev.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН. 119991 Москва, Ленинский проспект, д.53. (499) 1326722 savinov@lebedev.ru

