

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Карасева Виктора Юрьевича
на диссертационную работу Зобнина Андрея Вячеславовича
«Комплексная газоразрядная плазма: формирование объёмных
плазменно-пылевых структур и взаимодействие пылевой компоненты
с плазмой тлеющего разряда» на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика
плазмы

1. Диссертация Андрея Вячеславовича Зобнина посвящена исследованию комплексной плазмы, формируемой в виде объемных пылевых структур в нескольких видах газового разряда. Методы исследования – это лабораторный эксперимент и компьютерное моделирование. На протяжении двух десятков лет результаты автора представляются на мероприятиях высокого уровня и публикуются в топовых изданиях. Решаемые задачи востребованы, например, исследования в безэлектродном разряде, диагностика заряда пылевых гранул, экспериментальные исследования в установке – аналоге, находящейся на борту МКС аппаратуре. Полученные результаты востребованы научным сообществом. Лично я обращался к ним дважды, при исследовании силы ионного увлечения 17 лет назад и в прошлом году при учете влияния пылевого облака на свойства разряда.

2. Структура диссертации следующая. Во **Введении** описан изучаемый объект, проведена «линия», показывающая направление исследования. Сформулирована цель работы, описана актуальность тематики и поставлена задача. Указаны научная новизна и значимость работы. Сформулированы защищаемые научные положения. Описана апробация работы и приведен список публикаций автора, его личный вклад. Сама диссертация состоит из 5 глав на 177 страницах, содержит 73 рисунка, 8 таблиц и список литературы на 209 позициях.

В **Главе 1** описаны исследования плазменно-пылевых структур в индукционном высокочастотном разряде. Описана экспериментальная установка, методика создания и наблюдения пылевой плазмы. Прямые экспериментальные результаты наблюдений пылевых структур даны в форме фрагментов видеоизображений.

Для диагностики разряда использована зондовая методика, представленная на схеме. Определены параметры плазмы, прежде всего характеристики электронов. С помощью оптической диагностики по индикатрисе рассеяния света измерены размеры пылевых частиц в зависимости от занимаемого уровня – вертикальной координаты для двух сортов частиц. Получена зависимость изменения размера частиц во времени.

Произведена диагностика заряда пылевых частиц в объемных структурах по предложенной методике столкновений двух различных размеров частиц – основных мелких и падающих крупных. Для реализации методики автору понадобилась скоростная съемка и соответствующая аппроксимация данных. Результаты измерения зарядов представлены в таблице для ряда давлений нейтрального газа.

Последний раздел Главы 1 посвящен изучению неустойчивости, возникающей у пылевой структуры в данном разряде – исследованию пыле-акустических

плазменных волн, возникающих при низких давлениях. В эксперименте применена скоростная съемка. Анализ результатов проведен на основе дисперсионного уравнения. По результатам определены заряды частиц, которые оказались в хорошем согласии с полученными по предыдущей методике.

В **Главе 2** изучается влияние столкновений ионов на заряды пылевых гранул. Автор описывает принятую численную модель. Пылевая частица изолированная, поглощающая, не эмитирующая, функции распределения равновесные. Подробно описаны положения и алгоритм расчета с учетом перезарядки ионов в окрестности частицы. Результаты моделирования сведены в таблицу 2.1 и даны на рисунках. Показано, например, что наличие столкновений приводит к слабой зависимости потенциала поверхности от размера частицы.

Далее, полученные расчеты сравниваются с экспериментом. Сначала это сравнение с измеренным в Главе 1 зарядом, данные приведены в таблице 2.2 и на рисунке 2.4. В пределах погрешности наблюдается согласие. Проявляется уменьшение заряда по мере роста отношения длины экранирования и длины пробега. Для сравнения расчета зарядов с данными в тлеющем разряде проведено определение зарядов по скорости дрейфа пылевых частиц на установке, аналоге находящейся на МКС, ПК-4. Для реализации метода выполнены зондовые измерения параметров плазмы, описанные в данном разделе. Результаты измерения поля, средней энергии и концентрации приведены в таблице 2.3. Вычисленные и измеренные заряды сравниваются на рисунке 2.7. Они хорошо согласуются, при этом данные в бесстолкновительном приближении OML лежат в стороне, давая завышенные значения.

Глава 3 посвящена изучению тока, идущего на малый зонд сферической формы с притягивающим потенциалом при наличии столкновений. Автор учитывал зависимость ионного тока от потенциала. Во-первых, решалось кинетическое уравнение для ионов. Автор подробно описывает и иллюстрирует процедуру решения. Результаты расчетов содержатся в таблице 3.1 и на графиках. Оказывается удобным использовать поправку к току, получаемому по модели OML. Ее зависимость от потенциала зонда представлена на рисунке 3.6. Внимание уделено зависимости потенциала на больших от частицы расстояниях. Ионный ток для разных радиусов зонда показан на рисунке 3.7.

Во-вторых, представлено сравнение полученных результатов с данными из Главы 2 и литературными сведениями. Сравнение демонстрирует рисунок 3.9 и 3.10. Все обсуждаемые количественные результаты находятся в хорошем согласии между собой.

Глава 4 посвящена описанию численного моделирования неоднородного положительного столба с нелокальной кинетикой электронов. Первоначально описываются модель и алгоритм решения. Приводится детальное описание нахождения функции распределения, формулировка кинетического уравнения, которое представляется в виде (4.3). Указаны рассматриваемые энергетические переходы для неона и сечения. Прежде всего, уравнение решалось для продольно однородного положительного столба, что определялось соответствующими граничными условиями и др. Автор описывает возникающие сложности и способы их устранения, например, перенормировку (4.24). Рассматривается распределение плененных электронов. Далее, уточненная функция распределения обобщается на

двумерный случай. Схема расчета в этом случае подробно обсуждена, представлена на отдельной диаграмме.

Далее рассматривается случай продольно неоднородного разряда, формируемого при смене сечения разрядной трубки. Это и метод тестирования модели, и возможность описать и измерить параметры в часто используемом случае формирования системы стоячих страт. Раздел начинается с описания экспериментальной установки, в частности, метода оптический диагностики: излучения в линиях неона и поглощения для измерения метастабильных атомов. Полученные данные представлены графически. Рассчитанные распределения потенциала и функции распределения даны графически на рисунках. Их совпадение позволило автору свободно использовать разработанную численную модель для описания разряда. Рисунок 4.15 наглядно демонстрирует результат модели по описанию страт.

В заключительной части Главы 4 рассматривается влияние пылевой компоненты на изучаемые процессы. Прежде всего, это влияние на кинетику электронов. Далее, автор провел расчет зарядов в системе пылевых частиц и длины экранирования.

Заключительная **Глава 5** посвящена изучению влияния пылевого образования на параметры плазмы в положительном столбе в неоне. Экспериментальная установка, включая систему регистрации, является аналогом установки ПК-4. Ее работа описана в начале Главы. Далее представляются эксперименты с единственным пылевым облаком в данной разрядной трубке. Показано, что при формировании пылевой плазмы интенсивность линий разряда возрастает. При производстве параболических полетов при определенных условиях в установке появляется раздвоение пылевого облака. Картины свечения даны на рисунках. Показано, что профили яркости по радиусу с пылью и без нее разнятся, рис.5.7.

Далее автор приводит качественные оценки и анализ результатов. Также производит численное моделирование, определяет потенциал и свечение разряда. Сопоставление данных, как я понимаю, потребовало рассмотрения эффективности поглощения электронов на пылевых частицах. Например, в приведенных расчетах для одиночного пылевого облака данные на графиках лучше согласуются в диапазоне от 40 до 60% отражения электронов.

Отмечено сильное влияние пылевого облака на продольное электрическое поле и на формирование системы страт.

В **Заключении** диссертации приводятся выводы по всей работе, которые соответствуют формулируемым на защиту научным положениям. А также содержится список цитированной литературы.

3. Диссертация написана ясным языком с подробными объяснениями в сложных местах. Тем не менее, у меня возникло несколько замечаний-вопросов по тексту.
 - В двух местах, например, на стр. 109, речь идет о «погодных условиях». Это солнечный блеск, или что-то иное?
 - На стр. 122 и др. речь идет о классификации страт, о **d** страте. Это отличается от принятой в уже классических работах Ю.Б. Голубовского **r** или **q** стратах? Насколько я понял, речь идет о дробных резонансах.

- В нескольких местах говорится об отличии условий от применения OML теории по давлению, и тогда применяется модель «радиального движения». Правильно ли я понимаю, что речь идет о «радиальном дрейфе»?
4. Актуальность работы уже отмечена в самом начале отзыва. Актуальность тематики несомненна. Пылевая плазма почти тридцать лет является актуальной и востребованной междисциплинарной областью.
 5. Научная новизна заключается, на мой взгляд, в исследовании пылевой плазмы в безэлектродном ВЧ разряде емкостного типа и построении модели разряда с учетом нелокальной кинетики электронов.
 6. Теоретическая значимость работа, по моему мнению, в исследовании элементарных процессов при взаимодействии пылевой системы с собственно плазмой.
 7. Практическая значимость работы заключается в использовании полученных знаний при проведении уникального эксперимента ПК-4, а также при работе установок, где плазма эффективно взаимодействует с поверхностью. Результаты могут быть применены в ряде организаций: Институте Общей физики им. А.М. Прохорова, МГУ им. М.В. Ломоносова, Институте прикладной физики РАН, Троицком институте инновационных и термоядерных исследований, МФТИ, СПбГУ, ОИВТ РАН и др.
 8. Апробация работы выполнена на ведущих мероприятиях с 2000 г. по 2020 г.
 9. У автора более 50 публикации в журналах, в том числе, в работе приведены 19 из списка ВАК.
 10. В диссертации указан личный вклад автора, в работах он основной.
 11. В заключении хочу сказать, что рецензируемая работа является полноценной диссертацией очень хорошего уровня. Она настолько интересная, что можно было бы задать множество вопросов и касательно эксперимента, и касательно результатов моделирования, в частности, о влиянии пылевой плазмы на параметры разряда. Но я ограничусь лишь двумя **вопросами** по моментам диссертации, которые касаются моего собственно экспериментального опыта.
 1. В Главе 1 исследуется объемная плазменно-пылевая структура. В выводах по Главе автор называет ее упорядоченной, что несомненно подтверждается фотоизображениями, например, рис.1.2. В собственных исследованиях я работал с индукционным разрядом с полидисперсными частицами, и не под плазмодом, не над ним, где структуры формировались, хорошей упорядоченности не наблюдалось. Мой вопрос: проводились ли какие-либо оценки степени упорядоченности?
 2. На основании рисунков 1.10 – 1.14 произведены заключения о деградации размеров частиц в основной части плазменно-пылевой ловушки. Получена зависимость размеров частиц от времени нахождения их в плазме, оценена скорость потери размера от давления. В собственных исследованиях я работал в стратах в близких разрядных условиях, но с разными размерами частиц, от 1 мкм до 11 мкм. Самая наглядная полученная зависимость – скорость потери массы от размера частиц. Вопрос следующий: можно ли сопоставить скорость потери размера частиц двух используемых размеров? Частицы хоть и относительно малы, но отличаются практически вдвое.

В заключение отзыва скажу, что замечания и вопросы не портят позитивной картины полученных результатов. Рецензируемая диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Зобнин Андрей Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры Общей физики I
Физического факультета СПбГУ
Доктор физико-математических наук
«26» июля 2021



----- В.Ю. Карасев

Адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7-9
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
<http://www.spbu.ru>
E-mail: v.karasev@spbu.ru
Тел.: (812) 428-44-66



Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей

Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.html>