

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

