

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Санкт-  
Петербургский государственный  
университет»  
профессор С. В. Аплонов



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
Савина Василя Николаевича «МЕХАНИЗМЫ ЗАРЯДКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В  
ПЛАЗМЕ РАЗРЯДА С УЧЕТОМ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ», представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.04 – Физическая электроника.

Представленная для защиты кандидатская диссертация посвящена исследованию элементарных процессов в комплексной (пылевой) плазме, связанных с формированием заряда пылевой гранулы. За 20 лет исследования комплексная плазма превратилась не только в отдельный тип плазмы, но и в междисциплинарную область исследования, важную для ряда наук. Ее отличительной особенностью является то, что заряд пылевой частицы имеет достаточно большую величину  $10^3 - 10^5$  элементарных. Это приводит к процессу самоорганизации пылевой компоненты и формированию упорядоченных пылевых структур, являющихся моделью вещества в различных фазовых состояниях. Для описания свойств пылевых частиц необходимы точные знания параметров фоновой плазмы, а также строгая теория, связывающая характеристики плазмы с параметрами пылевых частиц. С другой стороны, точное знание параметров пылевых частиц может быть использовано для диагностики самой плазмы. Например, наблюдая за

положением пылевых частиц и их движением в плазме в зависимости от ее параметров можно получить распределение потенциала и электрического поля в тех случаях, когда невозможно использовать другие методы диагностики, в частности, метод электростатического зонда. Иначе говоря, пылевая частица может быть использована как зонд для определения плазменных параметров. Поэтому заряд пылевой частицы это ключевой параметр, требующий как можно более точного определения. В этом контексте и выбранная тематика, и сама работа **актуальны**.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 117 страницах, включая 38 рисунков и список литературы из 101 позиции. Имеется приложение на 29 страницах.

Во **Введении** описана постановка задачи, цель работы, ее новизна и практическая значимость, личный вклад автора, апробация работы и выносимые на защиту положения. Перечислены статьи автора из списка ВАК.

**Глава 1** посвящена обзору литературных источников. Рассматриваются теоретические модели, используемые при описании процесса зарядки пылевых частиц в плазме газового разряда. Рассмотрены экспериментальные работы по определению заряда пылевых частиц в плазменно-пылевых образованиях.

**В главе 2** рассматривается процесс зарядки пылевой частицы с учетом вторичной, ионно-электронной, фото и термоавтоэлектронной эмиссии, а также шероховатости поверхности частицы. Для численного расчета заряда используются уравнения баланса заряда и энергии на поверхности пылевой частицы.

**В главе 3** для более подробного описания процесса зарядки пылевых частиц в плазме разряда учтено влияния столкновений ионов с атомами и ионизация. При этом для формирования потоков частиц используются уравнения баланса и движения ионов и электронов, а также уравнение Пуассона. Распределение электронов принято бoльцмановским вне зависимости от режима движения ионов на поверхность пылевой частицы. Для оценки области возмущения плазмы используется та называемая целевая функция. Поток ионов рассчитывается стандартно. Рассчитанные распределения плазменных параметров представлены в виде трехмерных графиков. Также в главе показано, что шероховатости поверхности влияет на распределения плазменных параметров.

**В главе 4** методика расчета, развитая в главе 3, адаптирована для случая зарядки пылевой частицы в объемном плазменно-пылевом образовании.



Частица не считается уединенной, так как область ее возмущения может быть больше радиуса расчетной ячейки Зейтца-Вигнера. Для расчетов изменяются параметры подобия и целевая функция, а также граничные условия ячейки. Рассчитанные концентрации ионов и электронов, их скорости, значения потенциала и заряда представлены в виде трехмерных графиков. Проведенные далее в главе расчеты показывают, что с ростом частоты ионизации распределения параметров в ячейке изменяются. Соотношение между длиной возмущения и размером ячейки характеризует степень влияния плазменного пылевого образования на параметры плазмы, аналогично общепринятому параметру Хавнесса. Также проведено исследование влияния эмиссионных процессов на заряд частицы в плазменно-пылевом образовании. Проведено краткое сравнение с другими расчетами и экспериментами.

В **заключении** представлены основные результаты, полученные в диссертации.

Работа производит положительное впечатление. Она позволяет рассмотреть проблему зарядки частиц в пылевой плазме, или работы электрического зонда, в контексте изменения параметров в широком диапазоне, что далеко не всегда возможно при работе в конкретном типе разряда, с одним размером частиц и при одном давлении плазмформирующего газа, а значит, позволяет прогнозировать и оценивать физические процессы и их роль в зарядке пылевых частиц.

Диссертационная работа организована логично, написана понятным языком, вопросов по тексту нет, но есть **замечания**:

1. Сопоставление с реальным экспериментом. В конце диссертации отведено лишь пол страницы текста, посвященного сравнению с экспериментальными работами. Если автор говорит об особенности работы, как расчетах в широком диапазоне параметров, то было бы естественным произвести сравнение заряда с экспериментальными работами в более широком диапазоне, хотя бы с теми работами, которые освещены в диссертации литературном обзоре.
2. Расчет потока электронов производится на основе представления о максвеловском распределении. Но в условиях низких давлений и малых токов, в частности в тлеющем разряде, функция распределения электронов существенно не локальная, и расчет по ней может приводить к существенным ошибкам.
3. При описании фотоионизации используется плотность потока фотонов. Вопрос вызывает выражение (1.45) в тексте диссертации, поскольку не отражает специфику процесса переноса излучения из



плазмы на частицу при наличии больших коэффициентов поглощения, до  $10^{5-6} \text{ см}^{-1}$ .

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

### **Заключение по работе**

Диссертационная работа Савина Василия Николаевича «Механизм зарядки пылевых частиц в плазме разряда с учетом эмиссии электронов» представляет собой законченный научный труд. Представленные теоретические исследования процесса зарядки пылевых частиц выявляют закономерности физические процессов связанных с зарядкой, и могут способствовать развитию ряда практических приложений в широких диапазонах параметров.

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

Представляется целесообразным использовать результаты работы в Объединенном институте высоких температур РАН, Российском научном центре "Курчатовский институт", Физическом институте РАН, Московском энергетическом институте, Московском физико-техническом институте, ГНЦ РФ Физико-энергетический институт, Институте химической физики РАН, Московском инженерно-физическом институте, Петрозаводском государственном университете, Троицком институте термоядерных и инновационных исследований, Институте проблем механики РАН.

На основании вышеизложенного считаем, что представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Результаты исследования доложены диссертантом на научном семинаре кафедры Общей физики-1 Санкт-Петербургского государственного университета 12 мая 2017 года.

Отзыв подготовлен профессором кафедры Общей физики-1 СПбГУ, доктором физико-математических наук Карасевым Виктором Юрьевичем.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании коллектива кафедры Общей физики-1 Санкт-Петербургского государственного университета (протокол № 5 от 12 мая 2017 года).

Отзыв составил

профессор кафедры Общей физики-1

Карасев Виктор Юрьевич

подпись В.Ю. Карасева заверяю

Заведующий кафедрой Общей физики-1  
д.ф.-м.н., профессор

Машек Игорь Чеславович

подпись И. Ч. Машека заверяю

Личную подпись заверяю  
начальник отдела кадров №3  
Н.И. Машек



Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет»

Университетская наб., 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034

тел.: +7 (812) 328-20-00, <http://spbu.ru>

e-mail: [spbu@spbu.ru](mailto:spbu@spbu.ru)