

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Савина Василия 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

Пылевая плазма в последние десятилетия активно исследуется, что мотивировано широкой распространенностью пылевой плазмы во Вселенной (межзвездные облака и туманности, ионосфера Земли и т.д.), а также многочисленными приложениями ее в технике (плазмохимические и термоядерные реакторы). Спектр направлений исследования пылевой плазмы весьма широк: волны в пылевой плазме, образование упорядоченных структур пылевых частиц и фазовые переходы в этих структурах. К этому перечню стоит добавить проблему определения заряда пылевых частиц в плазме, что и является темой исследования в диссертации В.Н.Савина. Данная проблема весьма важна, так как адекватное определение заряда является ключом к пониманию механизмов образования систем взаимодействующих пылевых частиц. В посвященных данной проблеме литературных источниках уделено мало внимания изучению комплексного влияния разных типов эмиссии электронов (вторичная, ионно-электронная, фото- и термоавтоэлектронная), а также шероховатости поверхности пылевой частицы на ее заряд, что определяет **актуальность** работы В.Н.Савина. Кроме того, результаты, полученные в данной работе распространяются на учет эмиссионных эффектов при экспериментальном определении параметров плазмы зондовыми методами, а также на развитие теории зондовых методов диагностики плазмы, что дополнительно подчеркивает **актуальность и научную ценность** работы.

**Цель** данной работы – построение физико-математической модели процесса зарядки пылевых частиц с учетом ионизации атомов в промежуточном режиме: при произвольном соотношении радиуса частицы, дебаевского радиуса и длины свободного пробега ионов.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы и приложений.

Во **введении** обосновывается актуальность представленной работы, сформулированы цель и задачи исследования, новизна, практическая значимость работы, а также защищаемые положения.

**Первая глава** посвящена обзору существующих литературных источников по данной тематике. Рассмотрены различные теоретические и экспериментальные методы определения заряда пылевых частиц в плазме разряда. Освещены вопросы влияния эмиссии электронов на заряд пылевых частиц, влияния плазменно-пылевых структур на параметры плазмы и определения размера области возмущения плазмы в окрестности уединенной пылевой частицы или зонда. Сделан вывод о необходимости исследования процесса зарядки с учетом комплексного влияния эмиссии электронов различного типа, шероховатости поверхности, ионизации атомов и столкновений ионов с атомами.

Во **второй главе** изложены результаты расчета заряда пылевых частиц с учетом влияния всех типов эмиссии и шероховатости поверхности в режиме применимости ограниченного орбитального движения, а также с учетом влияния столкновений ионов с атомами. Расчет базировался на использовании уравнений баланса заряда и энергии на поверхности пылевой частицы. Показано, что эмиссия электронов, шероховатость поверхности и столкновения ионов с атомами существенно влияют на величину заряда пылевых частиц.

**Третья глава** посвящена разработке модели зарядки уединенной пылевой частицы, справедливой в широком диапазоне параметров

невозмущенной плазмы при произвольном соотношении характерных длин задачи (радиус частицы, дебаевский радиус, длина свободного пробега ионов и атомов) с учетом влияния всех основных типов эмиссии, шероховатости поверхности пылевой частицы и ионизации атомов. Модель использует уравнения моментов, уравнения Пуассона и уравнения баланса заряда и энергии на поверхности пылевой частицы. Далее, в данной главе описана разработанная диссертантом методика расчетов по предложенной модели, позволяющая при заданных параметрах невозмущенной плазмы определить заряд (потенциал) пылевой частицы, размер области ее возмущения, а также распределения плазменных параметров в этой области. Приведены избранные результаты расчетов.

**В четвертой главе** рассмотрен процесс зарядки пылевой частицы в плазменно-пылевом образовании. Для описания зарядки частицы в ячейке Зейтца-Вигнера (с учетом всех вышеназванных эффектов) использована модель, развитая в гл. 3, которая модифицирована с учетом отличия концентраций ионов и электронов на границе ячейки для плотных плазменно-пылевых образований. Рассчитаны соотношения параметров плазмы в ячейке Зейтца-Вигнера, исходя из условия ее электронейтральности.

**В приложении** приведены тексты программ, реализующие расчеты согласно предложенным алгоритмам. Приведен метод определения концентрации плазмы на основании зондовых измерений с использованием модели, описанной в третьей главе. Показано, что процесс эмиссии электронов с поверхности зонда может существенно влиять на величину определяемой концентрации плазмы.

**Новизна** работы состоит в том, что впервые разработана модель процесса зарядки пылевых частиц с учетом комплексного влияния эмиссии электронов разных типов, шероховатости поверхности, ионизации атомов и столкновений ионов с атомами. Кроме того, предложена методика

самосогласованного расчета по разработанной модели для уединенной пылевой частицы и для частицы в плазменно-пылевом образовании. Также предложена модификация расчета параметров плазмы по зондовой теории с учетом влияния эмиссии электронов с поверхности зонда.

Согласие развитой автором теории с имеющимися экспериментами, с данными других авторов, а также убедительная обоснованность исходных положений теории обеспечивают **достоверность** сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций.

**Научная-практическая значимость** диссертационной работы определяется тем, что в ней получена новая физическая информация о процессе зарядки пылевых частиц с учетом эмиссионных процессов в широкой области плазменных параметров. Данная информация может быть использована как при теоретических исследованиях, так и при анализе экспериментальных данных. Основными перспективными направлениями практического применения результатов являются: физика пылевой плазмы, физика космоса и зондовая теория.

Результаты работы опубликованы в четырех научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК. Результаты были доложены на шести всероссийских и международных конференциях и опубликованы в виде статей и тезисов докладов. Опубликованные работы и автореферат достаточно полно отражают основное содержание диссертации.

По диссертационной работе Савина В.Н. имеются следующие **замечания:**

1). Автор исследует плазму разряда при давлениях газа порядка Торр. При этом эффекты адсорбции атомов газа на поверхности пылевой частицы рассмотрены лишь с точки зрения передаваемой частице энергии от атомов.

Но адсорбция атомов заметно влияет на работу выхода поверхности и на коэффициенты разного рода эмиссии электронов. Последствия такого влияния на итоговые результаты работы обойдены вниманием.

2). Вывод 2 к гл. 2, в том виде как он приведен в тексте (стр. 56), очевиден. Следовало бы сопроводить его количественными данными. Например указать: начиная с какой степени шероховатости «затруднение выхода электронов эмиссии и, соответственно, уменьшение влияния эмиссионных процессов на заряд» уже нельзя полагать малыми.

3). Объяснение зависимости нормированной плотности потока ионов на поверхность частицы от параметра  $\delta_i$ , (рис. 3.14), данное автором на стр. 81, вызывает сомнение. Начальная стадия смены падения ростом имеет место не на всех кривых рис. 3.14: на кривых 2 и 4 ее нет. Величина падения всюду мала и не превосходит 1%. Не связано ли такое поведение расчетных кривых при  $\delta_i \leq 10^{-3}$  просто с погрешностями численного счета?

Указанные замечания не затрагивают основных результатов диссертации, а также положений, выносимых на защиту, не снижают положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне.

Диссертационная работа Савина В.Н. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение фундаментальной задачи о влиянии различных видов электронной эмиссии на заряд пылевых частиц плазмы, что может пролить свет на физику процессов образования систем взаимодействующих пылевых частиц в природных и искусственно создаваемых пылевых плазмах.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученой степени», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а сам автор, Савин Василий Николаевич, заслуживает присуждения ему искомой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 –  
физическая электроника.

Д.ф.-м-н., профессор кафедры  
физической электроники  
Санкт-Петербургского Политехнического  
университета (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)



Головицкий А.П.

195251, г. Санкт-Петербург,  
Политехническая ул., 29.  
Тел. (812)5526127  
e-mail: alexandergolovitski@yahoo.com

