

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Гловы Александра Федоровича 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

Диссертационная работа Зобнина Андрея Вячеславовича посвящена исследованию пылевой плазмы при введении в газовый разряд макрочастиц микронного размера и охватывает широкий круг исследуемых вопросов: свойства образующихся плазменно-пылевых структур, механизм зарядки пылевых частиц, методы численного моделирования плазмы с пылевой компонентой, влияние пылевой компоненты на структуру и свойства основного разряда. Пылевая плазма широко распространена в природе, возникает в продуктах горения, в различных технологических процессах, например, при обработке материалов плазменными потоками и лазерным излучением. Поэтому актуальность представленных в работе исследований не вызывает сомнений.

Структурно диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 177 страницах, содержит 73 рисунка и 8 таблиц, список литературы содержит 209 наименований.

Во введении формулируется цель работы, обосновывается актуальность исследований, приводятся научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения и перечень работ по теме диссертации, отмечен личный вклад соискателя и достоверность результатов работы.

Первая глава посвящена исследованию плазменно-пылевых структур в индукционном разряде частотой 100 МГц. Приводится описание экспериментальной установки и вид структур в различных благородных газах при разных давлениях, сформированных как из полидисперсных частиц оксида церия, так и из сферических монодисперсных частиц меламин-формальдегида. Основные измерения проводились в неоне с монодисперсными частицами с исходным диаметром 1.87 или 0.99 мкм.

В начале главы в отсутствие пылевой компоненты приведены результаты измерений зондовым методом плотности электронов и потенциала в зависимости от расстояния до индуктора. Двумя способами определена температура электронов: по наклону спадающей ветви второй производной тока и по наклону логарифма электронной плотности от потенциала. Следует отметить, что зондовые измерения требуют тщательного выбора параметров электрической цепи. Автор работы этот выбор убедительно обосновывает.

Для измерения распределения частиц по размеру в сформированной плазменно-пылевой структуре и эволюции размера с течением времени использовалась теория рассеяния света Ми на частицах сферической формы. В результате облучения структуры лазерным излучением в виде ножа и регистрации рассеянного излучения под разными углами было установлено, что в верхней части структуры существует градиент в распределении частиц по размеру, когда по мере увеличения размера частицы локализуются на большем расстоянии от индуктора. С течением времени размер частиц в заданном сечении из-за распыления уменьшается, найдена скорость распыления. Нижняя часть структуры не дает резкого изменения интенсивности пиков рассеяния в зависимости от угла, что объясняется преобладанием здесь агломератов не сферической формы из

слипшихся частиц и неприменимости теории Ми. В этом разделе можно отметить большой объем проделанной работы по обработке экспериментальных данных, учитывая известную сложность теории Ми.

Далее в первой главе приводится схема эксперимента, методика и результаты измерений заряда частиц в пылевом облаке. Методика основана на измерении изменения импульса мелкой частицы, заряд которой измеряется, при ее взаимодействии с пролетающей крупной частицей. В расчетах не учитывалось изменение размера мелких частиц в зависимости от расстояния. Полученные здесь результаты сравниваются с результатами расчетов автора по зарядке частиц, представленными во второй главе.

Заключительная часть главы посвящена исследованию пыле-акустических плазменных волн, самовозбуждающихся в плазменно-пылевых структурах. По результатам видеосъемки определена частота и пространственный период волн, дается оценка концентрации частиц в облаке и других параметров. Следует отметить оригинальный способ избавления от нижней части плазменно-пылевой структуры, состоящей из агломератов слипшихся частиц, путем резкого изменения мощности разряда.

Во второй главе методом Монте-Карло рассмотрено влияние столкновений ионов с нейтралами на заряды пылевых частиц. Модель основана на следующих предположениях: плазма состоит из электронов и однозарядных положительных ионов; частица изолирована, имеет сферическую форму, полностью поглощает поступающие на нее электроны и ионы, вторичная эмиссия отсутствует; функция распределения электронов является равновесной; столкновения ионов происходят только с газом и соответствуют процессу резонансной перезарядки.

Рассчитанный заряд частиц в 2-4 раза меньше расчетов по бесстолкновительной модели из-за увеличения потока ионов и неплохо согласуется с измерениями по пролету крупной частицы, а также с результатами, определенными из анализа пыле-акустических волн, представленными в главе 1. Дополнительным свидетельством корректности предложенной модели является хорошее согласие результатов расчетов с измерениями по скорости дрейфа частиц в положительном столбе разряда постоянного тока.

Плавающий потенциал частицы заметно уменьшается по сравнению с бесстолкновительной моделью, что также объясняется увеличением потока ионов.

В третьей главе представлены результаты расчетов ионного тока на малый сферический притягивающий зонд с учетом столкновений с нейтралами. Расчеты проводились, в основном, при тех же предположениях, что и в главе 2, за исключением того, что распределение электронов по скоростям является неравновесным. Применялся итерационный метод решения кинетического уравнения для ионов совместно с уравнением Пуассона, чтобы исключить флуктуации электрических полей на больших расстояниях из-за флуктуации числа частиц в методе частиц в ячейке.

Были получены зависимости ионного тока от потенциала зонда для двух значений радиуса зонда и частоты столкновений, и при разных отношениях температуры электронов к температуре газа. Полученные значения тока превышают ток в отсутствие столкновений на величину вычисленной поправки, позволяющей оценить это превышение в зависимости от размера зонда и частоты столкновений.

Указанная поправка использована для вычисления плавающего потенциала зонда в неоне в зависимости от приведенного давления при максвелловском распределении электронов. Результаты расчетов хорошо согласуются с расчетами, представленными в главе 2, и расчетами других авторов.

Таким образом, представленные в главе 3 результаты, распространенные на пылевые частицы, позволяют проводить расчеты плавающих потенциалов и зарядов частиц с произвольной функцией распределения электронов в тлеющих разрядах низкого и среднего давления.

Четвертая глава содержит результаты численного моделирования пространственно-неоднородного положительного столба разряда постоянного тока с нелокальной кинетикой электронов.

В начале главы приводится описание численной модели неоднородного по радиальной и продольной координате положительного столба разряда в неоне без пылевой компоненты и процессов расчета функции распределения электронов, скорости ионизации и скорости образования и тушения метастабильных атомов, пространственных распределений электрического поля, плотности электронов, включая плененные электроны, и плотности метастабильных атомов.

Далее в четвертой главе представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований положительного столба разряда в неоне в трубке со ступенчатым изменением радиуса от 0.69 см до 1.5 см. Анод расположен на противоположном конце трубки большего радиуса. Для токов 4 и 10 мА при давлении 40 Па и тока 10 мА при давлении 90 Па приводятся расчетные распределения электрического потенциала, плотности электронов и скорости ионизации, отражающие формирование неподвижных страт, затухающих в направлении анода. Функция распределения электронов имеет сложную структуру, содержащую максимумы в зоне страт. Установлено, что падение потенциала на страте отличается от значений для бегущих страт. Измерения интенсивности излучения разряда на длине волны 585 нм и поглощения излучения с длиной волны 653.3 нм вдоль диаметра трубки в зависимости от продольной координаты хорошо согласуются с расчетами. В экспериментах по поглощению это позволило определить концентрацию атомов в метастабильном состоянии и сравнить ее с результатами расчетов.

Заключительная часть главы посвящена вопросу включения пылевой компоненты в самосогласованную модель разряда. При заметном вкладе объемного заряда частиц в условие квазинейтральности, предложена интерполяционная формула для концентрации ионов для расчета потока ионов на частицу, когда концентрация берется на границе ячейки Зейца-Вигнера. Пылевая компонента влияет на пространственное распределение параметров плазмы. Поэтому по аналогии со ступенчатым изменением радиуса разрядной трубки, предложенная модель также позволяет описывать стратификацию разряда, вызванную таким видом локального возмущения.

Пятая глава посвящена исследованию влияния пылевого облака на плазму положительного столба разряда постоянного тока в неоне. Приводятся экспериментальные результаты, полученные на установке ПК-4 в условиях микрогравитации, и их интерпретация автором работы на основе модели, представленной в четвертой главе.

Эксперименты проводились с частицами меламин-формальдегида диаметром 6.86 мкм. Экспериментальные результаты для одного облака (полярность разряда не меняется, ток 1 мА, давление 60 Па) представлены фотографиями разряда в лучах линий неона с длиной волны 703 и 585 нм и во всем видимом диапазоне, фотографиями частиц и продольными распределениями интенсивности на указанных длинах волн без облака и с облаком. В экспериментах с двумя облаками (полярность разряда меняется с периодом 4 мс, ток 1 мА,

давление 40 пА), кроме фотографий разряда и частиц, приведены продольные распределения интенсивности на тех же длинах волн и распределение интенсивности рассеянного излучения в зависимости от времени. Представлены также радиальные распределения интенсивности (585 нм) без пыли и с пылью.

В расчетах для одного облака получены двумерные распределения электрических потенциалов, плотности электронов и интенсивности свечения разряда на длине волны 585 нм в зависимости от коэффициента адсорбции электронов, подтверждающие наблюдаемую в экспериментах стратификацию разряда со стороны анода. Представленные осевые распределения плотности электронов, электрического поля, скорости ионизации и интенсивности свечения также подтверждают этот эффект. Некоторое несоответствие измерений результатам расчетов интенсивности и скорости дрейфа частиц в самом облаке вплоть до его границы со стороны анода (имеют осциллирующий характер); объясняется принятым в расчетах предположением о постоянной концентрации частиц в облаке. Наилучшее согласие расчетов скорости дрейфа частиц с измерениями получено при коэффициенте адсорбции электронов 0.6.

Это значение адсорбции принято в расчетах для двух облаков. Получены аналогичные двумерные и осевые распределения параметров разряда, отражающие периодическое возникновение страт со стороны анода при изменении полярности. Подробно обсуждается роль продольного электрического поля, возрастающего по направлению от плененных электронов к голове облака, и приводящего к увеличению интенсивности свечения.

В целом можно отметить, что предложенная автором работы модель хорошо описывает результаты экспериментов на установке ПК-4.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Замечания к работе:

1. Известно, что теория Ми относится к однократному рассеянию. В главе 1 отсутствует обоснование этого для условий эксперимента.

2. Из текста диссертации не ясно, в чем состоит отличие в условиях проведения экспериментов при возбуждении пыле-акустических волн (раздел 1.5) и в их отсутствие, когда проводятся измерения по рассеянию лазерного излучения на частицах (раздел 1.3) и по определению заряда частиц (раздел 1.4).

3. В главе 3 (рисунок 3.1, 3.2 и 3.3) приводится 6 вариантов траекторий ионов: по два варианта с ближней и дальней точкой возврата, и 2 варианта с двумя точками возврата. Желательно было бы привести, помимо формул, несколько слов о том, как эти варианты влияют на результаты расчетов ионного тока.

В результате анализа представленного материала отметим следующее:

1. Научная новизна. Впервые исследованы условия формирования и свойства плазменно-пылевых структур в высокочастотных разрядах индукционного типа. Впервые показано, что учет столкновений ионов с нейтральными атомами позволяет производить корректный расчет зарядов пылевых частиц, а также вольт-амперных характеристик малого сферического притягивающего зонда для условий плазмы тлеющего разряда. Разработана модель разряда с нелокальной кинетикой электронов, позволяющая рассчитывать радиальную и продольную структуру положительного столба при изменении радиуса разрядной трубки или присутствия пылевого облака. Впервые наблюдалась стратификация положительного столба, вызванная облаком пылевых частиц.

2. Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в том, что результаты измерений заряда частиц хорошо согласуются с

расчетами, а разработанная модель разряда с возмущением в виде пылевого облака и предсказанной возможностью стратификации разряда полностью оправдала себя при сравнении с экспериментом. С практической точки зрения эффект стратификации разряда является примером проявления самоорганизации в диссипативных системах и поэтому имеет фундаментальное значение. Предложенный подход к его описанию может быть использован при развитии работ в этом направлении в таких организациях, как АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», МГУ им. М.В. Ломоносова, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИОФАН им. А.М. Прохорова, СПбПУ Петра Великого, МИФИ.

3. Современный уровень эксперимента, полнота проведенных численных расчетов и корректность интерпретации результатов, а также вполне достаточный иллюстративный материал и перечень цитируемой литературы - все это подтверждает достоверность материала и достаточную степень обоснованности и новизны положений и выводов.

4. Положения, вынесенные на защиту, прошли широкую апробацию и хорошо известны специалистам, о чем свидетельствуют публикации автора в 27 статьях, в том числе в 19 из перечня ВАК, и доклады результатов исследований на 13 конференциях.

5. Личный вклад соискателя вполне достаточен. Им были проведены все расчеты, включая постановку задачи. Во всех экспериментах автор принимал непосредственное участие.

6. Автореферат в полном объеме и с правильной расстановкой акцентов отражает содержание работы.

7. Приведенные замечания не снижают несомненных достоинств диссертации.

Таким образом, 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.

Доктор физ.-мат. наук, профессор,

начальник лаборатории  Глова А.Ф. «10» августа 2021 г.

Тел.: +7(495)851-06-49, e-mail: afglova@triniti.ru


Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»).

Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12,

тел.: +7(495)841-53-09, e-mail: liner@triniti.ru

Лично подписать Глова А.Ф. заверяю.

И.о. генерального директора АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,

кандидат физ.-мат. наук  Климов Н.С. «10» августа 2021 г.

Тел.: +7(495)851-06-49, доб. 4625; e-mail: klimov@triniti.ru

