

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной
работе Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Федерального
исследовательского центра
«Институт общей физики
им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»

канд.ф.-м.н.



/ Кочиев Д.Г./

« 14 » 06 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

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 1.3.9 (01.04.08) – физика плазмы

Диссертационная работа А.В. Зобнина посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию трёхмерных структур заряженных макрочастиц в плазме газовых разрядов. Особое внимание в работе уделено изучению процесса зарядки микрочастиц в слабоионизованной плазме с учётом столкновений ионов с нейтральными атомами и численному моделированию положительного столба разряда постоянного тока с пылевым облаком конечного размера. В работе представлены комплексные экспериментальные исследования плазменно-пылевых структур в плазме индукционного высокочастотного разряда; результаты численного моделирования процесса зарядки макрочастицы в изотропной плазме в широком диапазоне длин свободного пробега ионов; представлена численная двумерная модель положительного столба разряда постоянного тока с нелокальной кинетикой электронов; представлены результаты экспериментального и численного исследования влияния протяженных структур из макрочастиц на структуру газоразрядной плазмы, в частности на интенсивность свечения в отдельных спектральных линиях.

Работа обладает **научной новизной** и является актуальной.

Плазма является наиболее распространённым состоянием вещества во вселенной. Также и с точки зрения практического применения исследования плазмы занимает существенное место в различных научно-технических областях. Твёрдые частицы могут возникать в плазме в процессе конденсации, плазмо-химических реакций, или вводиться в плазму специально. Потоки электронов и ионов приводят к накоплению значительного заряда на макрочастицах, что обуславливает их сильное взаимодействие друг с другом и, в частности, приводит к формированию упорядоченных структур. Рекомбинация электронов и ионов на макрочастицах оказывает существенное влияние на структуру газоразрядной плазмы. Размер, форма, плотность и структура ансамбля макрочастиц определяется полями амбиполярной диффузии и потоками плазмы. Поэтому вопрос о взаимодействии конденсированного вещества с плазмой и газом имеет важное значение для объяснения наблюдаемых в пылевой плазме явлений. Все это определяет **актуальность данной работы.**

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа А.В. Зобнина состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации составляет 177 страниц, включая 73 рисунка и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 209 наименований.

Во **Введении** даётся обоснование актуальности темы диссертации, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту и приводится список работ автора по теме диссертации.

Первая глава посвящена описанию экспериментальной установки для исследования структур из макрочастиц в плазме высокочастотного разряда индукционного типа, методов диагностики и результатов определения параметров структур макрочастиц в газоразрядной плазме. Показано, что даже при использовании калиброванных монодисперсных макрочастиц в засыпке в сформировавшемся облаке присутствуют частицы различных размеров, сепарированные в пространстве, была измерена скорость плазменного травления полимеламинформальдегидных частиц в плазме неона. Приведены результаты определения произведения зарядов макрочастиц двух размеров путем наблюдения за столкновениями частиц разного размера. Описаны результаты наблюдений и анализа самовозбуждающихся волн плотности в структурах макрочастиц. Для интерпретации наблюдаемых явлений использовались данные зондовых измерений параметров фоновой плазмы.

Во **второй главе** представлены результаты численных расчётов зарядов макрочастиц в изотропной слабоионизованной плазме неона при различных давлениях и

двух значениях температур электронов, приведены результаты экспериментов по измерению зарядов макрочастиц в положительном столбе разряда постоянного тока в условиях микрогравитации. Показано, что столкновения ионов с нейтральными атомами в условиях, типичных для газоразрядной плазмы, существенно увеличивают поток ионов на макрочастицу и уменьшают её заряд по сравнению с бесстолкновительной моделью в несколько раз.

В третьей главе описаны расчёты ионного тока на сферический зонд при различных притягивающих потенциалах путём численного решения кинетического уравнения для ионов с модельным интегралом столкновений методом функции Грина. Получены аналитические аппроксимации вольт-амперных характеристик, позволяющие проводить расчёты зарядов макрочастиц для произвольных функций распределения электронов.

Четвертая глава посвящена описанию численной модели продольно и радиально неоднородного положительного столба разряда постоянного тока в неоне с учетом нелокальной кинетики электронов на основе решения кинетического уравнения в двучленном приближении для электронов и дрейфовом приближении для ионов. Для тестирования модели проведены экспериментальные измерения концентраций метастабильных атомов и абсолютных интенсивностей излучения в линии неона 585 нм в плазме разряда в трубке с переменным сечением. Показано, что модель количественно описывает скорости возбуждения уровней неона и структуру неподвижных страт, возникающую в области резкого изменения радиуса разрядной трубки, приводится объяснение механизма формирования неподвижных страт. Модель дополнена включением в расчёт пылевой компоненты путём самосогласованного расчёта зарядов макрочастиц, учётом объёмного заряда на них, рассеяния и рекомбинации ионов и поглощением электронов.

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных исследований протяжённых структур из макрочастиц в разряде постоянного тока в условиях микрогравитации и результаты численных экспериментов. Показано, что в области расположения макрочастиц значительно возрастает интенсивность свечения плазмы, а за пределами пылевого облака формируется структура, похожая на неподвижные страты. Численное моделирование показывает, что увеличение интенсивности свечения разряда связано с возрастанием продольного поля разряда и скорости ионизации. Возмущение положительного столба носит нелокальный характер и сопровождается формированием структуры неподвижных страт, аналогичных тем, что наблюдаются при наличии значительного изменения радиуса разрядной трубки.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе и сделаны выводы.

В качестве замечаний следует отметить следующее:

- 1) На странице 34 при обсуждении влияния распыления частиц в разряде постоянного тока на не учитывается не учитывается распыление катода, площадь которого значительно больше площади частиц и катодное падение потенциала также примерно в десять раз больше потенциала на частицах;
- 2) При расчете функции распределения электронов (пункт 4.1.2, стр 82 и ниже) используется предположение о малости радиуса трубки по сравнению с длиной энергетической релаксации. Но по физическому смыслу эти величины имеют один порядок, поскольку падение потенциала на страте и на радиусе трубки имеет порядок потенциала ионизации;
- 3) Сечение ионизации неона электронным ударом, стр. 86, в полтора раза ниже общепринятого (см., например, Ю.П. Райзер и многие другие работы);
- 4) На стр. 110 говорится о заметном росте концентрации метастабильных атомов в течении полутора часов при каждом включении разряда и этот эффект связывается с дегазацией стенок из-за протока газа. Для проверки этой гипотезы необходимо привести зависимость характерного времени выхода на стационар от скорости протока газа, также необходимо указание на то, как происходило выключение: сначала выключался ток а потом проток газа или наоборот. Это очень интересный момент надо исследовать в дальнейшем дополнительно, что может значительно сократить время отжига трубки;

Эти замечания не снижают общую положительную оценку работы и важность полученных результатов. Диссертационная работа А.В. Зобнина выполнена на высоком научном уровне и вносит большой вклад в область исследования плазменно-пылевых структур и описания формирования структур сильно взаимодействующих макрочастиц и механизмов взаимодействия пылевой компоненты с плазмой тлеющего разряда. Автореферат отражает содержание диссертации правильно и полно.

Научная и практическая значимость работы. Значимость представленных в работе исследований определяется теоретическими и экспериментальными результатами исследования эволюции плазменно-пылевых систем и их свойствах. Полученные в работе данные могут использоваться для изучения явлений самоорганизации и фазовых переходов в открытых диссипативных системах. Развитие методов диагностики динамических характеристик макрочастиц в плазменно-пылевых системах имеет большое прикладное значение. Результаты исследования пылевой плазмы могут найти приложения для выявления особенностей поведения высокодисперсной пылевой компоненты, например, в установках термоядерного синтеза. Полученные в работе результаты по

исследованию динамических плазменно-пылевых структур позволяют глубже понять возникновение и существование различного рода неустойчивостей.

Полученные экспериментальные сведения о кинетике самоорганизации в пылевой плазме могут быть полезны для разработки практических методов управления пылевой компонентой в плазме, что может лечь в основу новых методов производства материалов с заданными свойствами и повышению качества различных технологических плазменных процессов.

Результаты, представленные в данной работе, могут найти применение в исследованиях специалистов, занимающихся изучением пылевой плазмы, ее свойств и практических приложений. Представляется целесообразным использовать результаты работы в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур РАН, Национальном исследовательском центре "Курчатовском институте", Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском энергетическом институте, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Санкт-Петербургском государственном университете, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском физико-техническом институте, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химической физики РАН, Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Московском инженерно-физическом институте, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики РАН и других научных организациях.

Публикации и личный вклад автора. Автором совместно с соавторами опубликовано 19 научных статей в российских и зарубежных научных журналах из перечня ВАК, которые легли в основу настоящей диссертационной работы. Диссертация обобщает результаты, представленные в научных публикациях автора. Вклад автора в совместно написанные работы заключается в постановке научных задач, участии в экспериментах, обработке экспериментальных результатов, разработке численных моделей и проведении расчётов, а также подготовке рукописей к публикации. Все теоретические и экспериментальные результаты, приведённые в диссертации, были получены при личном участии автора, включая участие в параболических полётах, а численные расчёты проводились с использованием программ, написанных автором.

Достоверность результатов и апробация работы. Представленные в диссертации результаты экспериментальных исследований с высокой точностью повторяются в экспериментах на различных установках и согласуются с результатами численных исследований и теоретическими предсказаниями других авторов. Результаты диссертационной работы многократно докладывались на российских и международных конференциях.

В целом диссертация представляет собой законченную научную работу, в которой получен ряд важных научных результатов как фундаментального, так и прикладного характера. Диссертационная работа «Комплексная газоразрядная плазма: формирование объёмных плазменно-пылевых структур и взаимодействие пылевой компоненты с плазмой тлеющего разряда» полностью соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Зобнин Андрей Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа была заслушана на семинаре № 1557 теоретического отдела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) 02.06.21 г. Отзыв составлен ведущим научным сотрудником, доктором физико-математических наук Майоровым С.А., заслушан и одобрен на заседании ученого совета теоретического отдела ИОФ РАН, протокол № 6 от 09 июня 2021 г.

В. н.с., д.ф.-м.н.

Председатель ученого
совета теоретического
отдела, д.ф.-м.н., проф.



С.А. Майоров



Н.Г. Гусейн-заде