

ОТЗЫВ

официального оппонента Сухинина Генндия Ивановича на диссертацию Зобнина Андрея Вячеславовича **«Комплексная газоразрядная плазма: формирование объёмных плазменно-пылевых структур и взаимодействие пылевой компоненты с плазмой тлеющего разряда»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Новизна и актуальность. Диссертационная работа Зобнина Андрея Вячеславовича посвящена комплексным исследованиям пылевой плазмы, образованию плазменно-пылевых структур и взаимодействию пылевой компоненты с плазмой тлеющего разряда. Более четверти века назад, после открытия пылевых кристаллов в 1994 году сразу в нескольких экспериментальных группах, пылевая или комплексная плазма сформировалась в самостоятельный раздел физики плазмы. Начались интенсивные исследования пылевой плазмы, в том числе, процессов самоорганизации и образования пространственных пылевых структур. Зобнин А.В. является одним из активнейших участников этого исследовательского процесса. Работы Зобнина А. В., посвященные экспериментальному и теоретическому исследованию зарядки пылевых частиц, протеканию коллективных процессов и процессов самоорганизации в плазме индукционных ВЧ разрядов, в плазме положительного столба тлеющих стратифицированных разрядов с пылевыми частицами оказывались на самом переднем крае исследований. Все эти исследования пылевой плазмы как экспериментальными, так и теоретическими и численными методами были актуальными и новыми на момент выполнения и остаются актуальными и не потеряли новизны и в настоящее время. Все экспериментальные задачи, изученные в диссертации, моделировались самыми передовыми методами, применяемыми в низкотемпературной плазме и адаптированными для рассмотрения пылевой компоненты.

Краткая характеристика основного содержания диссертации. Диссертация Зобнина А.В. состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 176 страниц, 71 рисунок, 8 таблиц и список литературы из 208 наименований.

В первой главе **«Исследование плазменно-пылевых структур в индукционном высокочастотном разряде»** представлены результаты всесторонних исследований, плазменно-пылевых структур из частиц микронных размеров в индукционной (безэлектродной) ВЧ плазме благородных газов. Были проведены зондовые измерения параметров плазмы в области нахождения пылевых структур. Разработан оригинальный метод измерения заряда пылевых частиц, в котором определялось произведение заряда частиц из пылевой структуры и заряда пролетающей через структуру частицы большого размера из анализа динамики их столкновения. Были обнаружены

самовозбуждающиеся волны плотности (пыле-акустические волны) на краю индукционного ВЧ разряда. По регистрации индикатрисы рассеяния лазерного луча на частицах с использованием теории Ми определено распределение частиц по размерам и зарегистрировано уменьшение размера частиц во времени со скоростью порядка 0.1 нм в секунду вследствие плазменного травления материала частиц.

Во второй главе **«Влияние столкновений ионов с нейтралами на заряды пылевых частиц в изотропной плазме»** рассматривается влияние столкновений ионов с нейтралами на зарядку пылевых частиц. Проводится численное моделирование зарядки уединённой пылевой частицы в однородной изотропной плазме с максвелловской функцией распределения электронов по энергиям в широком диапазоне отношений размера частицы и длины свободного пробега к радиусу Дебая. Расчеты проводились для двух отношений температуры электронов к температуре ионов ($\tau = T_e/T_i$) и параметрах $P\lambda_D = (0-22 \text{ Па} \cdot \text{мм})$. Результаты моделирования сравниваются с результатами, полученными в экспериментах автора в индукционных ВЧ разрядах (Гл.1). Сравнение по зарядам частиц проводилось и с результатами, полученными в тлеющих разрядах постоянного тока на установке, являющейся прототипом установки ПК-4, из измерений скорости дрейфа пылевых частиц в неоне. Наконец, заряды частиц определялись из анализа пыле-акустических волн. Получено хорошее согласие. Можно сделать вывод, что столкновения ионов с газом приводят к уменьшению заряда пылевых частиц в 2-4 раза по сравнению с бесстолкновительной теорией OML.

В третьей главе **«Ионный ток на малый сферический притягивающий зонд в слабоионизированной изотропной плазме с учетом столкновений»** рассматривается процесс зарядки пылевой частицы с использованием итеративного метода решения кинетического уравнения в приближении Бхатнабара-Гросса-Крука (БГК) для функции распределения ионов и уравнения Пуассона для электрического потенциала, в предположении, что электроны имеют Максвелл-Больцмановское распределение. Такой подход имеет ряд преимуществ по сравнению с методами Монте Карло и РiС, поскольку существенно сокращает затраты машинного времени при расчётах многопараметрических режимов. Кроме того, флуктуации числа частиц и электрических полей, неизбежные в методе частиц в ячейках, затрудняют исследования области далёких расстояний и слабых полей. Уравнение БГК рассматривалось в переменных радиальная координата r , полная энергия иона W , момент импульса J . На каждой итерации находится функция Грина и «точное» решение для уравнения БГК.

По развитой модели для ионного тока на малый притягивающий зонд и потенциала вокруг зонда получены многопараметрические аппроксимации, хорошо описывающие расчеты, как собственные, так и других авторов (М.Лампе, Хатчинсона и Патачини, Семенова и др.). Получены правильные асимптотики потенциала на больших

расстояниях от сферического зонда для столкновительного и свободномолекулярного режимов, что является дополнительным свидетельством верности модели.

В четвертой главе **«Численное моделирование пространственно-неоднородного положительного столба разряда постоянного тока с нелокальной кинетикой электронов»** рассматривается самосогласованная итеративная модель с нелокальной электронной кинетикой как в продольно однородном положительном столбе разряда, так и в пространственно неоднородном (стратифицированном) разряде с пылевыми частицами. Рассматривается влияние пылевой компоненты на кинетику электронов и ионов в плазме газового разряда.

Проведено экспериментальное исследование и численное моделирование положительного столба разряда постоянного тока в неоне в разрядной трубке с резким изменением радиуса, приводящим к образованию стоячих (неподвижных) страт. Показано, что для неподвижных страт, формируемых локальным возмущением положительного столба, падение потенциала на страте отличается от резонансных значений, определяемых законом Новака для бегущих страт. Развитая модель неплохо описывает протяжённости стоячих страт и их затухание в разрядной трубке с резким изменением радиуса.

Разработана двумерная модель разряда постоянного тока с пылевой компонентой и нелокальной кинетикой электронов. Модель включает самосогласованный расчёт зарядов пылевых частиц, скорости рекомбинации плазмы и рассеяния ионов на пылевых частицах. Предложена интерполяционная формула для учёта влияния направленного движения ионов на ионный ток в слабо столкновительной плазме. Модель позволяет рассчитывать влияние пылевой компоненты на радиальное и продольное распределение параметров газоразрядной плазмы и описывает стратификацию разряда, вызванную локальным возмущением.

В пятой главе **«Исследование влияния пылевого облака на плазму положительного столба разряда постоянного тока в неоне»** приводится описание взаимодействия пылевых структур с плазмой положительного столба в разряде постоянного тока в условиях микрогравитации.

Эксперименты, приведенные в пятой главе, проводились в качестве подготовки к экспериментам на МКС в рамках проекта “Plasma Kristall-4”. Они проводились в параболических полетах Европейского Космического Агентства, в которых А.В. Зобнин принимал непосредственное участие на всех стадиях реализации проекта (создании прототипа установки Плазма Кристалл-4, в экспериментальных исследованиях параметров плазмы в наземных условиях, участии в проведении экспериментов в параболических полетах, в обработке и описании полученных там данных).

В параболических полетах и, позже, в экспериментах на МКС, наблюдались формирование и дрейф протяженного пылевого облака, увеличение интенсивности свечения плазмы в облаке по сравнению с излучением из областей разряда, соседствующих с облаком. Наблюдалось также разделение протяженного облака на два приблизительно одинаковых облака. Проводилось численное моделирование для условий, соответствующих экспериментам. Геометрические параметры облаков были взяты из экспериментов. Были проведены расчеты электрического потенциала и концентрации электронов в разрядной трубке, а также зарядов пылевых частиц в облаке. Для согласования экспериментальных и расчетных данных по излучению пришлось ввести коэффициент отражения электронов от пылевых частиц из меламин-формальдегида (порядка 60%). Обнаружено сильное влияние плотных плазменно-пылевых облаков на свечение плазмы разряда постоянного тока, обнаружен эффект стратификации разряда под влиянием пылевой компоненты, т.е. могут наблюдаться эффекты самоорганизации разряда и пылевой подсистемы, когда разряд стратифицируется под влиянием пылевого облака.

Работа Зобнина А.В. выполнена на высоком научном уровне. **Обоснованность и достоверность полученных результатов** обусловлена применением в исследовании физических методов измерений и математического аппарата, используемых в физике низкотемпературной плазмы и газовых разрядов, сравнением результатов, полученных в экспериментах и теоретически (в численных экспериментах). Все изученные в диссертационной работе задачи рассмотрены во всей полноте, с учетом всех процессов. В то же время, по нашему мнению, некоторые разделы написаны излишне лаконично. Можно было бы более подробно изложить результаты некоторых методологических исследований, расширить иллюстративный материал, что облегчило бы понимание полученных автором результатов.

По работе Зобнина Андрея Вячеславовича можно сделать ряд замечаний, а также задать ряд вопросов.

1. В пятой главе при рассмотрении потоков электронов на частицы в пылевых облаках учитывается отражение электронов от пылевых частиц. В первых же четырех главах отражение электронов не рассматривается. Какую погрешность в определение заряда пылевых частиц может вносить неучёт отражения электронов?
2. Сильно отрицательно заряженные пылевые частицы могут захватывать положительные ионы, которые орбитируют вокруг отрицательного ядра, образуя отрицательный «квазиатом». Каков средний заряд положительной оболочки и каково время жизни подобного «квазиатома»? Ответ на этот вопрос представляет интерес и

важен, поскольку захваченные ионы играют большую роль в экранировании пылевых частиц. Ответ может быть получен из анализа решения уравнения БГК (Гл. 3).

3. Специальный раздел в Главе 4 посвящен возникновению в трубках с тлеющим разрядом (вблизи границы отрицательного свечения и фарадеева тёмного пространства) области с отрицательным электрическим полем, являющейся потенциальной ямой (ловушкой) для электронов (и отрицательных пылевых частиц!). Инвертированные поля могут возникать и в сильных стратах. Накопление пленённых электронов в таких ловушках, как отмечается в диссертации, ограничивается рядом процессов. Это сверхупругие столкновения электронов с электронами с возбуждёнными атомами, кулоновские столкновения электронов между собой, рекомбинация электронов в столкновениях с ионами, диффузия по энергии при упругих столкновениях с нейтральными атомами, имеющими конечную температуру. Однако, локализация и форма таких потенциальных ям-ловушек задаётся из интуитивных или эмпирических соображений, т.е. не самосогласованно. При каких условиях эти ловушки возникают и в чём их необходимость для существования разряда? Каково соотношение в ловушках между плотностями электронов и пылевых частиц? По нашему мнению, адекватное решение задачи, т.е. нахождение положения, глубины и формы потенциальной ямы, концентрации электронов, ионов и пылевых частиц в яме, необходимо искать, рассматривая разряд во всей области от катода до анода, что невозможно сделать в двучленном приближении.

4. В Главе 5 рассматривается образование в разрядной трубке протяженных пылевых облаков. При их описании автором предполагалась пространственная однородность распределения пылевых частиц по объёму облаков. Не может ли неоднородность плотности пылевых частиц в облаке приводить к наблюдаемым в работе эффектам перераспределения излучения? Кроме того, внутри пылевого облака вблизи его поверхности возникает область с повышенной плотностью пылевых частиц, что приводит к возникновению своеобразного «поверхностного натяжения». Не в этом ли причина формирования перетяжек и дробления облака в разрядной трубке?

Вышеуказанные замечания и вопросы не снижают научной ценности диссертационной работы Зобнина Андрея Вячеславовича, а лишь свидетельствуют о сложности пылевой плазмы и указывают на необходимость дальнейших исследований в этой области физики.

Общее заключение. Основные результаты диссертации опубликованы в 26 научных работах, в том числе в научных статьях в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень ведущих периодических изданий. В целом диссертация Зобнина А.В. является законченным исследованием, представляет решение актуальных

задач физики пылевой плазмы. Автореферат и опубликованные статьи достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

В целом, результаты, полученные Зобниным Андреем Вячеславовичем, обладают новизной, имеют высокую научную и практическую ценность. Основные результаты работы опубликованы в высокорейтинговых журналах и докладывались и обсуждались на престижных международных и Российских конференциях, симпозиумах и научных семинарах.

Диссертация Зобнина Андрея Вячеславовича соответствует критериям, которым должна отвечать докторская диссертация согласно п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «физика плазмы».

Я, Сухинин Геннадий Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой Зобнина Андрея Вячеславовича и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,

Доктор физико-математических наук, Ст. н. с.,

Главный научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского Отделения

Российской Академии Наук (ИТ СО РАН),

профессор кафедры

Физики неравновесных процессов

физического факультета НГУ

Почтовый адрес:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1,

Е-mail: sukhinin@itp.nsc.ru

Тел. +7(961) 225 52 65

Сухинин Г.И.

13.07.2021

Подпись Г.И. Сухинина заверяю:

Ученый Секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.

Макаров М.С.

