

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета 24.1.193.01  
(Д 002.110.02) на базе Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких  
температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул.  
Ижорская, д. 13, стр. 2)  
от 15 сентября 2021 г. (протокол № 11)

Защита диссертации **Зобнина Андрея Вячеславовича**  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
**«Комплексная газоразрядная плазма: формирование объёмных плазменно-  
пылевых структур и взаимодействие пылевой компоненты с плазмой  
тлеющего разряда»**

Специальность 01.04.08 (1.3.9) – физика плазмы

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01(Д 002.110.02) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)

Протокол № 11 от 15 сентября 2021 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01(Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 21 (16 очно и 5 по zoom) человек, из них 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы (из них 9 очно) и 11 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника (из них 7 очно). Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

**Председатель** – зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

**Ученый секретарь** – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) д.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
3	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
2	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
4	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
12	Гавриков А.В.	Д.ф.-м.н., доцент	1.3.9	Присутствует
13	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
16	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
17	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Присутствует
18	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
19	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
20	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
21	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
22	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
23	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
24	Петров О.Ф.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
25	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
26	Савватимский А.И.	Д.т.н.	1.3.14	Отсутствует
27	Сон Э.Е.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
28	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
29	Филиппов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
31	Яньков Г.Г.	Д.т.н.	1.3.14	Присутствует

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации старшего научного сотрудника лаборатории 17.1 – плазменно-пылевых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Зобнина Андрея Вячеславовича** на тему «Комплексная газоразрядная плазма: формирование объёмных плазменно-пылевых структур и взаимодействие пылевой компоненты с плазмой тлеющего разряда». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9(01.04.08) – физика плазмы. Работ выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская 13 стр.2)

### Официальные оппоненты:

**Глова Александр Фёдорович** - гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор, начальник лаборатории в Государственном научном центре Российской Федерации «Троицком институте инновационных и термоядерных исследований» (Россия, 108840 г. Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12).

**Карасёв Виктор Юрьевич** – гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики-1 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского государственного университета» (Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7-9).

**Сухинин Геннадий Иванович** — гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1)

### Ведущая организация:

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»** (Россия, 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Глова А.Ф., д.ф.-м.н. Карасёв В.Ю. и д.ф.-м.н., профессор Сухинин Г. И.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Я приветствую всех, кто присутствует лично и присоединился к нам по видеоконференции. На этом заседании будет проводиться защита докторской диссертации Зобнина Андрея Вячеславовича. Прошу Михаила Михайловича ознакомить нас с необходимыми материалами.

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе, название диссертации, сообщает о заключении экспертной комиссии о том, что диссертация может быть принята к защите, и о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

### Председатель

Хорошо, если нет вопросов, тогда давайте перейдем к существу дела. Андрей Вячеславович, пожалуйста, вам слово.

### Зобнин А.В.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, аудио-видео запись доклада Зобнина А.В. прилагается).*

### Председатель

Спасибо, Андрей Вячеславович. Есть вопросы? Пожалуйста.

### Вараксин А.Ю.

Размер частиц, наверное, играет в исследуемых вами процессах большую роль. В начале доклада звучали слова «полидисперсные частицы», «монодисперсные частицы». Что вы вкладываете в слова «монодисперсные частицы»? У вас написано 1.87, потом 1.8, потом 1.87 плюс минус 9 сотых микрометра, но у вас есть сепарация частиц по размерам, прозвучал размер 1.64. А такие частицы в засыпке были? Поясните пожалуйста.

### Зобнин А.В.

Я не стал останавливаться на этом вопросе в докладе для экономии времени. В экспериментах использовались калиброванные фирменные частицы с паспортным размером 1.87 микрона и разбросом 9 сотых микрона для 99% частиц. Но эксперимент показал, что в плазменно-пылевых структурах частиц номинального размера не видно, хотя, если смотреть засыпку под микроскопом, то там всё верно, частицы правильного размера 1.87 мкм. Но, видимо, среди частиц попадают и более мелкие, составляющие долю процента, они и формируют пылевую структуру. Дело в том, что при небольшой засыпке образуются маленькие пылевые структуры, содержащие, скажем, сотню частиц. Структуры размером порядка сантиметра образовывались только при длительной или обильной засыпке. В них удерживалась лишь малая доля вбрасываемых частиц. Очевидно, они формировались из той малой фракции частиц с размерами существенно меньше номинального, которая составляет десятые доли процента. Такой достаточно неожиданный результат получился.

### Вараксин А.Ю.

И второй вопрос. У вас происходят довольно сложные процессы, которые вы изучаете много лет. Пылевые структуры влияют на плазму, плазма влияет на ваше пылевое облако, но у вас нигде на слайдах не приведены выражения для сил, действующих на пылевые частицы, ни для скоростей их дрейфа. Меня интересуют силовые факторы,

которые связаны с размерами частиц и сепарацией.

**Зобнин А.В.**

В представленных в диссертации расчётах распределение частиц в пространстве считалось фиксированным. Пылевые частицы движутся медленно, это инертная компонента, поэтому разумно проводить расчёты параметров плазмы при фиксированном положении частиц. Поэтому в представленной модели уравнения движения пыли не фигурировали. Но расчёты сил, действующих на частицу, проводились. Например на слайде показано сравнение измеренных скоростей дрейфа частиц в облаке и рассчитанных. Скорость дрейфа определяется силами, действующими на частицу, и трением о газ. Давление известно, поэтому скорость дрейфа может быть посчитана. Но эволюция облака не моделировалась.

**Председатель**

Спасибо. Пожалуйста, ещё вопросы.

**Васильев М.М.**

В продолжение вопрос Алексея Игоревича, первого вопроса. Андрей Вячеславович, когда вы объясняете размеры частиц, то основываетесь на решении обратной задачи теории Ми рассеяния на сферических частицах. Этот метод имеет ряд ограничений и требует определённых предположений, например сферичности частиц. Не может ли быть то отличие в сотые доли микрона от номинального размера частиц просто погрешностью метода измерений?

**Зобнин А. В.**

На зависимостях интенсивности рассеяния от размера частиц ширина пиков и провалов составляет сотые доли микрон, то есть интенсивность рассеяния резко меняется при очень малом изменении размеров частиц. Конечно, имеется несколько пиков. Если брать одну картинку, то может быть непонятно какой максимум рассеяния, соответствует максимуму яркости на изображении. Но сравнивая изображения, снятые под тремя разными углами, можно определить соответствие. Например, максимум, соответствующий размеру 1.74 микрона, отсутствует при угле 82 градуса, соответственно тот максимум яркости на изображении облака, сделанном под углом 74 градус, который соответствует провалу яркости на изображении под углом 82 градуса, показывает положение частиц размером 1.74 микрона. Таким образом, были идентифицированы области с определёнными размерами частиц. Погрешность метода видна из зависимостей рассеяния от размера частиц.

**Петров О.Ф.**

А какая чувствительность метода к показателю преломления частиц?

**Зобнин А.В.**

Показатель преломления хорошо известен. Более того, я его специально промерил с помощью набора имерсионных жидкостей.

**Петров О.Ф.**

Сразу могу возразить. Вот вы упомянули про плазменное травление, а значит, происходит плазменное модифицирование поверхности. Излучение взаимодействует с поверхностью, а значит показатель преломления может меняться. Некоторые исследования показывают, что могут появляться металлические включения. Вопрос как это всё контролировать?

**Зобнин А.В.**

Частицы имели микронные размеры, радиус частицы 0.9 микрона. Уменьшение размера вследствие плазменного травления около сотни нанометров. Соответственно слой, подвергающийся плазменной модификации, не превышает 100 нанометров. При такой толщине это не должно сильно повлиять на рассеяние.

**Председатель**

Если происходит отражение, то не важно, какая толщина.

**Петров О.Ф.**

Могу сказать, что поглощение меняется сильно. Это видно в экспериментах. Если вначале частицы не реагируют на излучение, то через 2 часа пребывания в разряде они начинают сильно на него реагировать.

**Зобнин А.В.**

Да, поглощение может меняться.

**Председатель**

Ответ на вопрос, как получены результаты - дан, а дискуссию, если будет необходимость, мы продолжим позже. Ещё вопросы есть?

**Амиров Р. Х.**

У меня есть вопрос о моделировании положительного столба с нелокальной кинетикой электронов. У вас там есть член, связанный с уходом электронов на стенку. Уход на стенку фигурирует как охлаждение электронов, потому что на стенке есть потенциал и на неё уходят горячие электроны. Вопрос звучит так. Вы рассчитывали потенциал стенки, или задавали его вручную? Он менялся по длине трубки?

**Зобнин А. В.**

Да, конечно радиальное распределение потенциалов и, соответственно, потенциал на стенке рассчитывались.

**Амиров Р. Х.**

То есть потенциал стенки считался самосогласованно?

**Зобнин А. В.**

Да, самосогласованно. И он несколько менялся по длине.

**Амиров Р. Х.**

А какие характерные значения были получены?

**Зобнин А. В.**

Сейчас скажу. 22 — 23 вольта относительно оси разряда для неона при 40 паскалях.

**Председатель**

Спасибо. Какие ещё вопросы?

**Храпак А. Г.**

Андрей Вячеславович, вы были одним из пионеров по исследованию пылевой плазмы в индукционных разрядах. Не могли бы вы сформулировать какие преимущества даёт индукционный разряд по сравнению с емкостным разрядом и разрядом постоянного тока?

### **Зобнин А. В.**

Когда вопрос заходит о преимуществах, то важно какие цели ставятся. В индукционном разряде функция распределения электронов ближе к Максвелловской, как показали зондовые измерения. В нём наблюдалось легче всего формирование объёмных, порядка сантиметра, трёхмерных структур, правда, жидкостного типа. Кристаллические структуры не наблюдались. В стратах разряда постоянного тока тоже наблюдаются трёхмерные плазменно-пылевые структуры. Трудно сказать, что проще создать. На момент начала работ по исследованию плазменно-пылевых структур, было интересно узнать в каких условиях, они формируются. Сначала плазменно-пылевые структуры были обнаружены в ёмкостном разряде, затем проводились исследования в разрядах постоянного тока и в индукционном разряде. В индукционном разряде получались сантиметрового размера облака. Это оказалось интересным. Насколько в этом преимущество индукционного разряда я не знаю.

### **Храпак А. Г.**

Скажите, а отсутствие электродов играет ли какую-то положительную роль?

### **Зобнин А. В.**

С одной стороны — да, это играет положительную роль с точки зрения более чистого наблюдения за пылевыми структурами, с другой — зондовые измерения отсутствие электродов сильно затрудняет. Для зондовых измерений приходилось вводить дополнительный электрод.

### **Председатель**

Спасибо, вот ещё я вижу вопрос, пожалуйста.

### **Яньков Г. Г.**

У вас много приведено распределений полей, потенциалов, полученных в расчётах. Уравнения у вас в основном нелинейные и источники в них не простые. Проверяться ли сходимость решения на сетке? Насколько достоверны результаты расчёта? Влияет ли шаг сетки на результат? Эти вещи проверялись?

### **Зобнин А. В.**

Речь идёт о моделировании разряда?

### **Яньков Г. Г.**

У вас было записано уравнение Пуассона, в правой части плохой источник. Вы его даже в линейном виде пытались представить.

### **Зобнин А. В.**

Надо различать две задачи. Это моделирование разряда в целом, где используются нелинейные уравнения и сложная итерационная схема. Решение получается итерациями. И есть задача расчёта зарядов частиц в облаке, причём локально в маленьком участке облака, где все параметры плазмы предполагаются известными. Они были получены на предыдущем шаге самосогласованного расчёта разряда. Возникает вопрос какой поток ионов будет приходить на частицу в этих заданных условиях? Численные расчёты зарядки и ионных токов предполагали уединённую частицу, а у нас частица в облаке, так что заряд на пылевых частицах сопоставим с зарядом ионов.

### **Председатель**

Андрей Вячеславович, извините, вы, кажется, объясняете применимость модели, а вопрос касался технической стороны сеточной сходимости.

### **Зобнин А. В.**

Понятно, да, конечно, при расчёте положительного столба сходимость счёта проверялась. Во-первых, в процессе счёта. Мне пришлось немало повозиться, чтобы подобрать такие формы поправок для потенциалов, чтобы обеспечить сходимость итераций. Расчёты проводились и на разных сетках.

### **Яньков Г. Г.**

Понятно. Можно показать ещё уравнение, нет, в конце четвёртой главы.

### **Зобнин А. В.**

Просто надо различать уравнение Пуассона, которое фигурирует при самосогласованном расчёте распределения потенциалов в положительном столбе и...

### **Яньков Г. Г.**

Я бы хотел посмотреть уравнение на последнем слайде по этой главе. Здесь вверху.

### **Зобнин А. В.**

А это уравнение для частицы в эффективной сферической ячейке Вигнера-Зейтца, линеаризованное вблизи границы ячейки.

### **Яньков Г. Г.**

Меня смущает, что в правой части, линейной по  $\phi$  минус  $\phi$  один, стоит положительный знак. Это соответствует положительной обратной связи. Уравнение Пуассона с положительным коэффициентом как квадрат как-то тяжело решать.

### **Зобнин А. В.**

А почему бы ему не быть положительным? Это же уравнение не волновое. Оно просто решается аналитически.

### **Председатель**

Хорошо, ещё есть вопросы? Кто-нибудь хочет что-то уточнить? Тогда, Михаил Михайлович, прошу вас ознакомить нас с письменными отзывами, поступившими в совет. Если в них есть изложение результатов, которые мы уже слышали, то эту часть можно опускать.

### **Ученый секретарь**

Коллеги, я начну с отзыва ведущей организации, и по предложению Николая Евгеньевича, я опущу техническую часть. Остановлюсь на замечаниях, сформулированных в отзыве. В качестве замечаний. Первое. На странице 34 при обсуждении распыления частиц в разряде постоянного тока не учитывается распыление катода, площадь которого значительно больше площади частицы и катодное падение потенциала примерно в десять раз больше потенциала на частицах. Второе. При расчёте функции распределения электронов (пункт 4.1.2. страница 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 один порядок потенциала ионизации. Третье. Сечение ионизации неона электронным ударом, страница 86, в полтора раза ниже общепринятого (смотри, например, Райзер и многие другие работы). Четвёртое. На странице 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. Тем не менее, в отзыве делается заключение, что работа является законченной научной работой, полностью соответствует всем критериям положения номер 842, и Андрей Вячеславович заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук. Отзыв подписан Сергеем Александровичем Майоровым, Гусейн-заде, председателем учёного совета теоретического отдела и заместителем директора по научной работе Института общей физики Давидом Георгиевичем Кочиевым.

На автореферат поступило шесть отзывов. Все отзывы положительные. Ряд из них имеют замечания. Первый отзыв поступил от Сергея Игоревича Попеля, доктора наук из Института космических исследований. Отзыв положительный, без замечаний. Второй отзыв поступил из Казахского национального университета имени Аль-Фараби. Отзыв подготовлен академиком Республики Казахстан, проректором по научной и инновационной деятельности Тлеккабулом Сабитовичем Рамазановым. Отзыв положительный, имеется ряд замечаний. Пылевая структура, представленная на рисунке 3 слева, выглядит более упорядоченной, чем структура на рисунке 2 (в). С чем это связано? Действительно ли пылевые структуры из полидисперстных частиц имеют большую степень упорядоченности, чем образованные монодисперсными частицами? На рисунке 8 не указаны погрешности измерений, что не позволяет судить каков вклад в разброс точек от эффекта проецирования на плоскость и от погрешности измерений смещений частиц. В формуле на странице 18 фигурируют переменные помеченные тильдой, но не дано их определения, если это безразмерные параметры, то неясно на что они нормированы.

На рисунке 18 (страница 26) линии, соответствующие результатам расчётов, очень тонкие и трудно различимы. Но, тем не менее, все замечания носят рекомендательный характер, а диссертант заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук. Третий отзыв поступил из Института теоретической и прикладной механики имени Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, подписан Ириной Вячеславовной Швейгерт. Отзыв положительный, имеется ряд замечаний. В выводах по первой главе говорится об упорядоченных структурах, не ни где не дано анализа степени упорядоченности, не ясно, наблюдались ли плазменно-пылевые кристаллы, или структуры жидкостного типа. В численных расчётах, представленных во второй главе, эффект отражения электронов от поверхности частиц не учитывался, тем не менее, говорится о хорошем согласии с экспериментальными измерениями зарядов частиц. А в пятой главе утверждается, что отражение электронов достигает 50 процентов. Как это согласуется? Несмотря на указанные замечания диссертант заслуживает присуждения учёной степени. Следующий отзыв на автореферат поступил из Института нефтехимического синтеза имени Топчиева Российской академии наук, подписан заведующим лабораторией Юрием Анатольевичем Лебедевым. Отзыв положительный, а по автореферату сделан ряд замечаний. Зондовые измерения параметров плазмы проводились в отсутствие пылевых частиц в чистом инертном газе, но экспериментально наблюдалось плазменное травление пластиковых микросфер. Как влияет поступление молекулярных примесей на параметры плазмы и заряды частиц? Некоторые переменные, встречающиеся в формулах и таблицах, например «ню» с тильдой, и ещё приведён целый переменных, не описаны в тексте автореферата. Однако, данные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общего уровня работы. Следующий отзыв поступил из Физического института имени Лебедева Российской академии наук, подписан профессором, доктором физ.-мат. наук Очкиным Владимиром Николаевичем. Отзыв положительный, а по автореферату сделан ряд замечаний. На некоторых рисунках, например 10, 17 и 18, линии очень тонкие и плохо отпечатаны. Неясно, в какой мере предположение об изотропности плазмы вокруг пылевой частицы, использованное в расчётах по определению её заряда, может применяться в плазме тлеющего разряда, особенно стратифицированного, в котором в области левитации пылевых частиц имеет

место сильное нарушение квазинейтральности плазмы и присутствуют сильные электрические поля, вызывающие сильный дрейф ионов. И наконец, последний отзыв (*читает шестой отзыв*) из Московского государственного университета, института ядерной физики НИИЯФ МГУ. Отзыв составил и подписал доктор физ.-мат. наук Паль Александр Фридрихович. Отзыв положительный, а по содержанию автореферата есть замечания. В нём отмечается, что при использовании полидисперсных частиц окиси церия в гелии и неоне при 150 — 300 Паскаль наблюдалось формирование пылевых облаков не только у нижней, но и у верхней границы светящейся области разряда. К сожалению, автор оставил без внимания такое интересное и мало изученное явление. Тем не менее, отзыв положительный, а диссертант заслуживает присуждения степени.

### **Председатель**

Спасибо. Андрей Вячеславович, часть замечаний имела технический характер, я думаю, вы с ними согласны, их не стоит перечислять, а остальные замечания просуммируйте с замечаниями от ведущей организации и по возможности ответьте, пожалуйста.

### **Зобнин А. В.**

На первый вопрос от ведущей организации ответу, что на странице 34 я привожу сравнение результатов моих измерений, скорости травления частиц в безэлектродном разряде с литературными данными по травлению частиц в стратах разряда постоянного тока. Поэтому мне трудно ответить влияет ли распыление катода на что-либо в экспериментах других авторов. Думаю, что нет, но сам я этим вопросом не занимался. По длине энергетической релаксации. Имеется ввиду длина, на которой меняется полная энергия, и кинетическая и потенциальная. В этом случае распределение потенциалов не существенно. Длина энергетической релаксации составляет несколько сантиметров. Нельзя сказать, что она прямо много больше радиуса трубки, но она, по крайней мере, в два — три раза превышает радиус трубки. Это оправдывает «глобальное» приближение, которое использовалось. Сечение ионизации я брал из более новых работ — из работы 1987 года, из базы данных «SIGLO», я их сравнивал. У Райзера данные из работ шестидесятых - пятидесятых годов. Что касается влияния скорости потока газа на концентрацию метастабильных атомов, то специального исследования не проводилось. Просто было замечено, что при горении разряда в течение полутора часов и при небольшом протоке неона на уровне 2 стандартных кубических сантиметров в минуту происходит выход всех параметров разряда на стационар. Это и использовалось, а специальных исследований не проводилось. Ещё из существенного. Применимость изотропного приближения для разряда постоянного тока. Это существенный вопрос, так как в стратах действительно могут быть сильные поля. Но в моей диссертации разряд постоянного тока с пылевыми частицами исследовался в условиях микрогравитации, и моделирование проводилось для таких условий. Там страты искусственно не создавались, они возникали вследствие воздействия на разряд пылевого облака. Величины продольного поля расчётные получались на уровне 5 Вольт на сантиметр. Это, конечно, даёт некоторую анизотропию, но скорость дрейфа ионов оставалась меньше тепловой скорости. Поэтому в первом приближении можно было считать плазму квази-изотропной. По степени упорядоченности. К сожалению, когда проводились исследования в индукционном разряде, у нас не было возможности исследования трёхмерной структуры бинокулярным зрением, или сканированием. Упорядоченность можно было определять только по сечению лазерным ножом. Наблюдался ближний порядок, как в структурах жидкостного типа. Дальний порядок и кристаллизацию ожидать было сложно из-за неоднородности параметров плазмы по высоте.

### **Ученый секретарь**

А в плане того, что в полидисперсных структурах упорядоченность была выше, чем

в структурах и монодисперсных микросфер?

### **Зобнин А. В.**

Сложно разобраться, какие частицы зависали при засыпке полидисперсных частиц, непонятно и какой они формы. Визуально, да, структуры из полидисперсных частиц, представленные на картинке, выглядят более упорядоченно. Возможно, это связано с большим давлением, при котором проводился данный эксперимент, или большим выбором частиц.

### **Председатель**

Спасибо. Мы тогда переходим к отзывам оппонентов. У нас три оппонента присутствуют. Первым я хочу пригласить Александра Фёдоровича Глову. И к вам такая же просьба, саму диссертацию мы уже заслушали, поэтому ваше мнение прежде всего.

### **Глова А. Ф.**

Во-первых, об актуальности работы. Тема безусловно актуальна, поскольку пылевая плазма и в природе присутствует, как уже говорилось, но она возникает и во многих технологических процессах. Например, при обработке поверхности плазменными потоками и лазерным излучением. Поэтому актуальность не вызывает сомнений. Я не стану пересказывать содержание, поскольку автор достаточно полно изложил его. Сразу перейду к замечаниям. У меня три замечания, я буду их зачитывать. Известно, что теория Ми относится к однократному рассеянию. В главе 1 отсутствует обоснование этого для условий эксперимента. Это первое. Из текста диссертации не ясно, в чём состоит отличие в условиях проведения экспериментов при возбуждении пыли-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). И третье замечание. В главе 3 (рисунок 3.1, 3.2 и 3.3) приводятся 6 вариантов ионов: по два варианта с ближней и дальней точкой возврата, и 2 варианта с двумя точками возврата. Наличие двух точек возврата путь иона увеличивает, то есть вероятность столкновения с перезарядкой возрастает, чем при одной точке возврата. Непонятно, как это всё влияет на ток ионов. Желательно было бы, помимо формул, объяснить это в диссертации словами. Это всё по замечаниям. Констатирующая часть довольно длинная. Научную новизну я опущу, поскольку она дважды упоминалась соискателем, практическую значимость тоже, и зачитаю некоторые стандартные положения, поскольку роль формулировок важна.

Современный уровень эксперимента, полнота проведённых расчётов и корректность интерпретации результатов, а также вполне достаточный иллюстративный материал и перечень цитируемой литературы — всё это подтверждает достоверность материала и достаточную степень обоснованности и новизны положений и выводов.

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

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

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

Приведённые замечания не снижают несомненных достоинств диссертации.

И самое главное. 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., ред.01.10.2018г. а ее автор Зобнин Андрей Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 физика плазмы.

### **Председатель**

Спасибо, Александр Фёдорович. Я думаю, к оппоненту вопросов нет. Тогда, пожалуйста, Андрей Вячеславович.

### **Зобнин А. В.**

На первое замечание я отвечаю так. Конечно, то что я в диссертации не уделил внимание обоснованию того, что можно применять однократное рассеяние, является упущением с моей стороны. Дело в том, что облако было прозрачным. Это было видно невооружённым глазом. Прозрачности облака, как правило, уже достаточно, чтобы однократное рассеяние, по крайней мере, доминировало. Бывают, конечно, случаи, когда двукратное рассеяние играет заметную роль, но это бывает только когда подсветка сильно неоднородна. В данном случае использовался максимально однородный по ширине лазерный «нож», который равномерно освещал всё облако так, что двукратное рассеяние не играло существенной роли. Коэффициент ослабления излучения на пылевой структуре не превышал нескольких процентов.

### **Председатель**

Если вы измеряете индикатрису рассеяния, то величина поглощения не имеет значения, поглощение может отсутствовать, а рассеяние быть сильным.

### **Зобнин А. В.**

Я говорю об ослаблении луча вследствие рассеяния, то есть доля рассеянного света не превышает нескольких процентов, соответственно, двукратное рассеяние не может исказить картину. По второму вопросу. Отличие условий экспериментов в разных давлениях. Возбуждение волн наблюдалось при давлениях, не превышающих 50 Паскаль, а исследования распределения по размерам проводились при 80 и 150 Паскалях. Эксперименты по измерению зарядов проводились с небольшими облаками, в которых при 30 и 50 Паскалях волны не возникали, а при 20 Паскалях волны были, но не мешали измерениям, так как частицы колебались в вертикальном направлении со скоростями, пренебрежимо малыми по сравнению со скоростью падения крупной частицы. То что касается различных траекторий ионов. Разные типы траекторий соответствуют разным областям фазового пространства, в каждой из которых функция Грина имеет свой вид. Но это одна функция Грина. При получении интегрального уравнения для концентрации ионов проводилось интегрирование по всему фазовому пространству. При этом вклад каких-либо определённых областей отдельно не выделялся и не анализировался.

### **Председатель**

Спасибо. Теперь слово предоставляется второму оппоненту Виктору Юрьевичу Карасёву. Пожалуйста.

### **Карасёв В. Ю.**

Остановлюсь на следующих моментах, показывающих научное значение работы, я хочу обратить внимание. Это метод измерения зарядов. В 2002 -2003 годах, когда методов измерения зарядов частиц практически не существовало, придумали метод зондирования падающими частицами, который мы заимствовали для исследования страт. Подобные идеи мы использовали при исследовании инверсии вращения в магнитном поле. Дальше, это ВЧ разряд. По нему уже говорилось, и у меня будут ещё вопросы. Безэлектродный индукционный разряд, огромное достоинство — объёмные пылевые структуры и чистый разряд. В 2000-ых годах мы начинали исследования с полидисперсными частицами и ставили контейнер в индукционный разряд. Катужку вокруг наматывали, чтобы почистить частицы. То, что структуры образуются и снизу и сверху, это не исследовано, наверно ни у

кого, но это потрясающе. Мы работали с полидисперсными частицами и упорядоченности не находили, но там должна быть очень интересная физика. Мы использовали индукционный разряд и наблюдали собственное вращение десяти микронных частиц. Поскольку нет тока, то можно использовать магнитное поле любого направления. В этом кроется большой потенциал. Дальше я упомяну при рекомбинацию и ионизацию. Это последние главы. Здесь тоже есть большой потенциал. Когда будет переход от режима разряда с потоком на стенку к режиму, когда ионизация и рекомбинация замыкается на пылевую структуру можно ожидать интересных явлений. Про деградацию частиц я задам более конкретный вопрос. Вклад в развитие нашей науки у Андрея Вячеславовича достаточный, чтобы говорить о всех аспектах от актуальности до приложений. Если говорить не только о достоинствах, но и о вопросах, то диссертация 180 страниц. Может быть, какие то вещи можно было бы подробнее описать. Есть вопросы технического характера. Я не понял, про погодные условия, как они могли влиять на измерения? Может, имелись ввиду лабораторные условия? И о классификации страт. Я учился по классификации Голубовского, не очень понял, как они совпадают. А по работе у меня есть два вопроса, и один из них уже прозвучал об упорядоченности структур. Ответ тоже был дан, что в индукционном разряде упорядоченность не исследовалась. Второй вопрос, про деградацию частиц. У нас есть цикл работ по деградации частиц. Мы умеем извлекать частицы из разряда на разных временах. И в диапазоне от 1 до 11 микрон очень сильно зависит деградация от размера частиц, видимо, это связано с потоками на неё. Поэтому, если у вас два размера частиц описаны, то можно ли их, как-нибудь сопоставить? Было бы интересно узнать, деградация каких частиц больше. Например, для 11-ти микронных частиц за 15 минут при наблюдении в страте больше 50 процентов массы теряется. Тут тип разряда другой, но, тем не менее зависимость от размера существенна.

Касательно выводов, скажу, что замечания и вопросы не портят позитивной картины результатов и рецензируемая 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., ред.01.10.2018г. а ее автор Зобнин Андрей Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 физика плазмы. На этом у меня всё.

### **Председатель**

Спасибо, Виктор Юрьевич. На ряд вопросов ответ, действительно, получен, что вы хотите добавить?

### **Зобнин А. В.**

По поводу деградации частиц. С частицами 0.9 микрона специальные измерения скорости уменьшения размера не проводились. Дело в том, что большая часть структуры состояла из агломератов слипшихся частиц, а область, занятая сферическими частицами была не большой и её форма менялась со временем. Из-за этого было сложно понять, не происходит ли перетекание частиц из одной части облака в другую. В случае частиц 1.87 микрона форма облака оставалась стабильной и только происходило уменьшение размера частиц в каждом месте облака. А с одномикронными частицами было труднее провести измерения и они, соответственно, не были проведены. Могу отметить только то, что со временем скорость деградации частиц резко замедлялась. Если первые 8 минут размер частиц практически линейно снижался, то через 20 минут размер частиц практически стабилизировался. Частицы висели в течении часа и практически не менялись, по крайней мере по виду фотографий облака. По-видимому, это связано с загрязнением разряда примесями, идущими от частиц. При этом менялся и цвет свечения разряда. Если вначале он был оранжево-красным, как положено в неоне, то через 20 минут он становился сиреневым, а через полчаса и вовсе голубым, то есть молекулы доминировали. С этим можно связать уменьшение скорости деградации частиц со временем.

## Председатель

Спасибо. Переходим к третьему оппоненту Сухину Геннадию Ивановичу.

## Сухин Г. И.

Прежде всего, мне хотелось бы отметить уникальность Андрея Вячеславовича как экспериментатора, исследователя. Он участвовал в создании, это не очень прозвучало, установки ПК — 4. В наземных исследованиях, измерениях, в параболических полётах, обработке результатов. Я бы хотел отметить, что не каждый экспериментатор настолько владеет теорией, как Андрей. Он продемонстрировал, что каждый его эксперимент можно понять из первых принципов. Я бы хотел отметить третью главу, где решается уравнение Бхатнагара-Гросса-Крука. Получено, фактически, аналитическое решение, и результаты этого решения, где получаются функции Грина и так далее. Может стать классическим примером решения уравнения БГК. И я хочу подтвердить, что некоторые результаты изложены лаконично, можно было бы, более развёрнуто представить материалы. По работе Андрея Зобнина можно сделать следующие замечания и задать вопросы. Я их зачитаю. 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 не учёт отражения электронов? 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). 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 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, то есть 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. И последний вопрос. 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? Все перечисленные замечания не снижают научной ценности диссертационной работы. Они лишь свидетельствуют о сложности рассматриваемых явлений. Дальше констатирующая часть. Представленные результаты обладают научной новизной, представляют научную и практическую ценность. Представленные результаты

были опубликованы в представительных журналах, представлены на ряде конференций. Диссертация Зобнина Андрея Вячеславовича соответствует критериям для докторской диссертации, установленным пунктом 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., ред.01.10.2018г., а ее автор несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 физика плазмы.

### **Председатель**

Спасибо, Геннадий Иванович. Пожалуйста, Андрей Вячеславович.

### **Зобнин А. В.**

По поводу отражения электронов. Отражение электронов от поверхности частиц приводит к уменьшению зарядов, но это уменьшение процентов на 30 - 40. В измерениях, представленных в первой главе, самый прямой метод - это метод столкновений. В нём экспериментальные заряды получались на те же 30-40 % меньше расчётных. То есть они как раз согласуются с наличием отражения. Также и эксперименты с дрейфом пылевых частиц в положительном столбе тоже в целом вполне согласуются с наличием отражения электронов. Особенно, если учесть, что присутствие пыли увеличивает напряжённость поля, а в расчёте зарядов частиц по скорости дрейфа предполагалось, что поле такое, как в разряде без частиц. Это даёт некоторое завышение зарядов, систематическую погрешность. Точно заряд померить не получается, всегда остаётся погрешность 20-30%, так что тут нет особого противоречия. Эффект отражения электронов казался не столь важным, он и действительно не столь важен, как эффект столкновений ионов с нейтралами, который уменьшает в разы заряд частиц. А тут 30-40 % не такая большая поправка.

По поводу образования квази-атома. К сожалению, в программе расчёта не разделялись ионы финитные и свободные. В принципе, можно написать программу, которая бы отделила ионы финитные и инфинитные. То, что касается времени жизни финитного иона, то оно, очевидно, порядка времени между столкновениями. Потому, что после очередного столкновения ион с большой вероятностью просто упадёт на частицу. Больше двух — трёх столкновений прожить ион на финитной траектории не сможет.

По поводу областей с отрицательным полем. Здесь все расчёты потенциалов, в конечном счёте, проводились самосогласованно. Правда, весь расчёт разряда разделялся на этапы, и каждый из этапов был в отдельности не самосогласован. Расчёт концентрации финитных электронов, запертых в потенциальной ловушке, проводился в предположении, что форма ловушки, распределение потенциалов является заданным. Но этот заданный потенциал брался из предыдущей итерации. Он включался в общую схему итераций. Поэтому в результате всё распределение потенциалов, в том числе и положения ловушек для электронов, рассчитывалось самосогласованно. В расчётах, где я моделировал разряд постоянного тока с облаками, области потенциальных ловушек всегда возникали вне пылевых облаков. Пылевые облака были заданы вручную, не просто вручную, а взяты из эксперимента, но считались заданными. В результате расчёта получались области с обратным полем, но вне облака, и там, соответственно, ни каких частиц не было.

То, что касается пространственной однородности, то это некоторое приближение, но оно обосновано экспериментально. Вот изображение пылевого облака, сечение лазерным «ножом». Здесь частицы выглядят более редкими потому, что лазерный «нож» имеет перетяжку посередине. По краям он шире. В этих экспериментах, правда не в конкретном данном эксперименте, но на той же установке, с такими же частицами и похожих условиях проводилось сканирование структуры поперёк плоскости лазерного «ножа». Поэтому у меня имелись экспериментальные данные по профилю лазерного ножа, позволявшие достаточно точно определять концентрацию частиц по счётной плотности в каждом участке изображения. Во всех частях облака, а понятно, что надо брать достаточно большие области порядка два на два миллиметра, чтобы уменьшить статистическую

погрешность, в разных таких частях концентрация отличалась в пределах 20 процентов. Поэтому для моделирования я принял, что концентрация везде постоянная. Повышение концентрации частиц вблизи границ облака в этих экспериментах нигде не наблюдалось. Здесь видно, что повышения концентрации нет. Также и на этом рисунке внизу, может хуже видно, но тоже концентрация частиц практически однородна и резко падает в ноль на границе без повышения, или понижения. Вот, собственно и всё.

### Председатель

Спасибо, Андрей Вячеславович. Мы теперь имеем время для дискуссии. Если кто-то хочет высказаться — пожалуйста.

### Петров О.Ф.

Мы сегодня выслушали работу, которая для Института высоких температур является традиционной. Потому, что исследования плазмы со взвешенными в ней частицами имеет историю. Эту плазму называют по-разному: плазмой с конденсированной дисперсной фазой, аэрозольной плазмой, дисперсной средой, и вот теперь стали называть пылевой плазмой. История в институте началась тогда, когда эта задача решалась в теор. отделе в восьмидесятых годах. Связана она была с рабочим телом МГД генератора на продуктах сгорания твёрдого топлива, в результате чего в плазме могли образовываться частицы как результат конденсации, либо частицы могли быть остатками не сгоревшего топлива. Вопрос возникал, как они влияют на состояние ионизационного равновесия? Задача была вполне востребована. И тогда в институте были сделаны классические работы, которые показали, что такая плазма может проявлять фазовые переходы. Речь шла о термической равновесной плазме, равновесной среде. Эти работы опубликованы в виде сборника, затем вышли отдельно, но это классика. Она была, есть и будет. Затем наступило затишье, и в середине девяностых годов... Вот эта работа не о термической плазме, это уже дальнейшая история. Работы были инициированы, когда появились наблюдения сразу в нескольких группах в Германии и в Японии тех структур, которые возникают в плазме газового разряда, когда частицы левитируют. Следует здесь отдать должное, Эрик Иванович Асиновский, как присутствующие знают, был руководителем отдела плазмы, человек необычайно широкой эрудиции, нашёл публикацию. Когда мы стали рассказывать, как работают зарубежные группы, как мы включились в работу, он нашёл публикацию. В публикации 80-ых годов в советском журнале описывалось, как наблюдались в высокочастотном разряде структуры частиц. Это было примерно лет за 10 до того, что потом появилось. Может срок был поменьше — лет 7, но существенный, но осталась эта работа незамеченной. Когда появились работы по тлеющим разрядам, со взвешенными частицами, возник вопрос что тут может институт привнести. И представленная работа — это ответ что можно привнести, какие можно сформулировать задачи, получить результаты. Всё это мы сегодня услышали. Работа заслуживает безусловной поддержки и квалификации, и правильно было сказано, что доктор наук сформировался. Я бы сказал, в каком-то смысле «перезрел», но в хорошем смысле. Что касается объекта исследований, я скажу несколько слов. Работы были инициированы в девяностых годах наблюдениями в газовом разряде, и исследования быстро переключились на газовый разряд. Почему? Потому, что установку можно было быстро собрать, легко было создать условия, когда частицы образовывали структуры, и ещё легче их было наблюдать. Занимаясь термической плазмой, а мы проводили исследования с пропан-воздушной горелкой, было необходимо 5-7 диагностик и более. Здесь поставили камеру, лазер и всё. Андрей Вячеславович сделал в диагностике большой шаг. И зондовые измерения, и применение теории Ми здесь дали новый результат. Вся эта наука, когда развивалась, вызывала необычайный интерес, но он пошёл на убыль. Сейчас идёт реинкарнация, хотя это, наверно, неудачное слово. Мы стали понимать, что происходит в разряде, что это не является равновесной системой. И эта система не является релаксирующей к равновесию. Эта система вдали от равновесия и



стационарна. А у таких систем есть удивительное свойство — способность к самоорганизации и эволюции. Они могут развиваться так, что энтропия в таких системах уменьшается. Понимание этого у нас возникло около пяти — семи лет назад, но научное сообщество приходит к этому последние несколько лет. Это означает, что вы сталкиваетесь впервые с открытыми системами и диссипативными структурами, состояние которых вы можете контролировать. Вопрос как? Это уже вопрос физических подходов. То что сделал Андрей Вячеславович — это, собственно, описание диагностики, что мы можем из эксперимента извлечь для того, чтобы двигаться дальше в экспериментальном смысле, для того, чтобы какие-то теоретические подходы разработать. И стоит сказать, что работы, представленные здесь, являются одними из самых цитируемых работ у нас в институте. Не самая цитируемая, самая цитируемая работа это обзор, а дальше идут работы Андрея Вячеславовича. Они востребованы. И та часть работы по космическому эксперименту, которая проводится в «ди-си» разряде, была бы просто невозможна без детального моделирования и экспериментальной диагностики. Поэтому работа заслуживает, на мой взгляд, поддержки, а диссертант действительно уже «перезрел».

### **Председатель**

Спасибо, Олег Фёдорович. Кто ещё хочет высказаться?

### **Сухинин Г. И.**

Я хочу добавить, что Андрей решал много задач по моделированию. Уравнения по нелокальной кинетике были, конечно, известны, но добавление ещё одной компоненты, пылевой, совершенно изменяет эти уравнения. Я бы назвал Андрея мастером итераций. Потому что столько итераций, вложенных одна в другую, и получается самосогласованное решение.

### **Председатель**

Да, представленная итерационная схема была очень многообразна. Спасибо. Из членов совета, участвующих дистанционно, Василяк Леонид Михайлович хочет высказаться.

### **Василяк Л. М.**

Добрый день, коллеги. Я эту работу имел возможность наблюдать в течение этих 20ти лет, и могу оценить, на каком уровне выполнены и экспериментальные, и теоретические работы. И более того, я был членом рецензентной группы, которая штудировала эту диссертацию, делала замечания, которые Андрей Вячеславовича благополучно исправил и рекомендовал ее к нашему диссертационному совету к защите.

Во-первых, должен сказать, что вот эта работа, она все время у Андрея Вячеславовича была в мэйнстриме. В начале было, какие в принципе могут быть возможности по созданию таких источников заряженных частиц. И работа сегодня вышла на очень высокий уровень в научном смысле. Это и полеты на МКС и, это несомненно свидетельствует, что данная работа актуальна. Что касается внешней экспертизы, поскольку часть работы выполнена с зарубежными соавторами, то можно считать, что работа была оценена, с точки зрения статей независимыми экспертами.

Поэтому я буду голосовать «за» и призываю членов совета проголосовать за эту диссертацию. Поскольку работа очень хорошая, а Андрей Вячеславовича Зобнин несомненно специалист высокого научного уровня.

### **Председатель**

Спасибо Леонид Михайлович. Больше никто не хочет высказаться? Тогда, Андрей Вячеславович, пожалуйста, заключительное слово.

### Зобнин А.В.

Большое спасибо за высокую оценку моей работы. Хочу поблагодарить моих руководителей Синельщикова Александра Ивановича, с которым я начинал работу, Усачева Александра Дмитриевича, начальника лаборатории. Очень благодарен я оппонентам за высокую оценку. Спасибо всем. Надеюсь на положительный результат голосования.

### Председатель

Спасибо за напутствие. Мы переходим теперь к голосованию. Поскольку у нас уже нарушена обычная процедура, то нам не нужна комиссия. Один человек соберёт голоса и тех, кто онлайн и наших с вами, здесь присутствующих. Я попрошу Михаила Михайловича эту функцию выполнить. Он является единственным человеком, который соберёт все сведения и ознакомит нас с ними.

### Ученый секретарь

Коллеги, я уточню. Это не нарушение порядка голосования, а это рекомендации Вячеславовича Минобрнауки как нам голосовать в режиме пандемии. Мы должны обеспечить тайну голосования. Поэтому всем, кто присутствуют лично, будут розданы бюллетени, голосование будет классическое, я получу по средствам связи мнение тех, кто присутствует онлайн по отдельности, после чего посчитаю результаты и ознакомлю вас.

### Председатель

Михаил Михайлович готов огласить, что у нас получилось.

### Ученый секретарь

Уважаемые коллеги, у нас проголосовали все члены диссертационного совета, которые присутствовали очно и онлайн на защите докторской диссертации Зобнина Андрея Вячеславовича. Присутствовало на защите очно 15 членов совета, из которых докторов наук по профилю **9**, на защите присутствовало онлайн 6 человек, из которых докторов наук по профилю **1**. Итого **21** член диссертационного совета, то есть у нас был кворум. **За** проголосовали **21** человек, **против - нет, недействительных - нет**.

### Председатель

Спасибо. Мы должны утвердить результаты голосования. Кто за? Против нет? Воздержавшихся нет? *(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно)*.

Спасибо большое, поздравляем.

Переходим к обсуждению проекта заключения. Есть замечания, пожелания? *(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения)*. Если больше нет желающих обсуждать проект, тогда мы должны его проголосовать с теми замечаниями, которые были высказаны. Кто за заключение с замечаниями, которые были указаны? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Спасибо, принято единогласно. *(Проект заключения принят единогласно)*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
Д 002.110.02(24.1.193.01), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 15.09.2021г. № 11

О присуждении Зобнину Андрею Вячеславовичу, гражданину Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Комплексная газоразрядная плазма: формирование объёмных

плазменно-пылевых структур и взаимодействие пылевой компоненты с плазмой тлеющего разряда» по специальности 01.04.08 (1.3.9) – физика плазмы принята к защите 11.05.2021г., (протокол заседания № 5) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Зобнин Андрей Вячеславович 1965 года рождения, в 1989 году окончил Московский физико-технический институт.

В 1998 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук на тему «Влияние пристеночной области на содержание СО в релаксирующем потоке продуктов сгорания» по специальности 01.04.08 — физика и химия плазмы.

Работает в должности старшего научного сотрудника, лаборатория №17.1 – плазменно-пылевых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории №17.1 – плазменно-пылевых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, начальник лаборатории в Государственном научном центре Российской Федерации «Троицком институте инновационных и термоядерных исследований» профессор Глова Александр Фёдорович;

- доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики-1 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского государственного университета» Карасёв Виктор Юрьевич;

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» Сухинин Геннадий Иванович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» (г. Москва) в своем положительном заключении, составленном ведущим научным сотрудником теоретического отдела д.ф.-м.н. Майоровым С. А. (утвержденном 14.06.2021г. заместителем директора по научной работе к.ф.-м.н. Кочиевым Д. Г.), указала, что научная значимость работы определяется теоретическими и экспериментальными результатами исследования эволюции плазменно-пылевых систем и их свойств. Развитие методов диагностики динамических характеристик макрочастиц в плазменно-пылевых системах имеет большое прикладное значение.

Результаты, представленные в работе могут найти применение в исследованиях специалистов, занимающихся изучением пылевой плазмы, её свойств и практических приложений. Представляется целесообразным использовать результаты работы в Объединенном институте высоких температур РАН, в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, в Московском энергетическом институте, в Санкт-Петербургском государственном университете, в Московском физико-техническом институте, в Институте химической физики РАН, в Московском инженерно-физическом институте, в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, в Институте проблем механики РАН и других научных организациях.

Соискатель имеет 56 опубликованных работ, из них по теме диссертации 19 работ в реферируемых журналах, 2 работы в сборниках трудов ОИВТ РАН, 6 тезисов в сборниках

конференций.

1. *V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. A. Sinel'shchikov, A. V. Zobnin, A. D. Usachev*, Inductively-Coupled Dusty Plasma // *Journal de Physique IV*, France, 10, Pr5-399-Pr5-402 (2000);
2. *A. V. Zobnin, A. P. Nefedov, V. A. Sinelshikov, V. S. Filinov*, Macroparticles ordered structures in induced discharge of low pressure // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, Т. 64, N 8. – с.1539-1544 (2000);
3. *А. В. Зобнин, А. П. Нефедов, В. А. Синельщиков, В. Е. Фортов*, О заряде пылевых частиц в газоразрядной плазме низкого давления // *ЖЭТФ* 118 №3 с.554-559 (2000);
4. *А. В. Зобнин, А. П. Нефедов, В. А. Синельщиков, О. А. Синкевич, А. Д. Усачёв, В. С. Филинов, В. Е. Фортов*, Упорядоченные структуры пылевых частиц в плазме высокочастотного безэлектродного газового разряда // *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, том 26, №5, с. 445-454 (2000);
5. *V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. A. Sinel'shchikov, A. D. Usachev, A. V. Zobnin*, Filamentary Dusty Structures in RF Inductive Discharge // *Physics Letters A*, V.267, P. 179-183 (2000);
6. *А. В. Зобнин, А. Д. Усачёв, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов*, Пыле-акустическая неустойчивость в плазме индукционного газового разряда // *ЖЭТФ*, Т.122, N.3, с. 500-512 (2002);
7. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, V. E. Fortov*, Spatial Separation of Dust Particles by their Sizes at the Diffuse Edge of RF Inductive Discharge Plasma // *AIP Conference Proceedings* 649. P. 293-296;
8. *V. E. Fortov, A. D. Usachev, A. V. Zobnin, V. I. Molotkov, and O. F. Petrov*, Dust-acoustic wave instability at the diffuse edge of radio frequency inductive low-pressure gas discharge plasma // *Physics of Plasmas* V.10. No5. P. 1199-1208 (2003);
9. *V. E. Fortov, O. F. Petrov, A. D. Usachev, A. V. Zobnin*, Micron-sized particle-charge measurements in an inductive rf gas-discharge plasma using gravity-driven probe grains// *Physical Review E* 70, 046415 (2004);
10. *S. Ratynskaia, S. Khrapak, A. Zobnin, M. H. Thoma, M. Kretschmer, A. Usachev, V. Yaroshenko, R. A. Quinn, G. E. Morfill, O. Petrov, V. Fortov*, Experimental Determination of Dust-Particle Charge in a Discharge Plasma at Elevated Pressures // *Physical Review Letters* 93, 085001 (2004);
11. *S. A. Khrapak, S. V. Ratynskaia, A. V. Zobnin, A. D. Usachev, V. V. Yaroshenko, M. H. Thoma, H. Höfner, G. Morfill, O. F. Petrov, V. E. Fortov*, Particle charge in the bulk of gas discharges // *Physical Review E* 72, 016406 (2005);
12. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, V. E. Fortov*, Ion current on a small spherical attractive probe in a weakly ionized plasma with ion-neutral collisions (kinetic approach) // *Physics of Plasmas* 15, 043705 (2008);
13. *А. В. Зобнин*, Нелокальная модель пространственно-неоднородного положительного столба разряда постоянного тока// *Теплофизика Высоких Температур*, Т. 47, № 6, с. 803-810 (2009);
14. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, V. E. Fortov, M. A. Bukharin*, Simulations of the DC-discharge Plasma with Dusty Structure // *Sixth International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (Garmisch-Partenkirchen, Germany May 16-20 2011)* AIP Conference Proceedings 1397, P. 150-151 (2011);
15. *S. A. Khrapak, M. H. Thoma, M. Chaudhuri, G. E. Morfill, A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, E. E. Fortov*, Particle flows in a dc discharge in laboratory and microgravity conditions // *Physical Review E* 87, 063109 (2013);
16. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, and V. E. Fortov*, Two-dimensional positive column structure in a discharge tube with radius discontinuity // *Physics of Plasmas* 22, 094701 (2015);
17. *A. Usachev, A. Zobnin, O. Petrov, V. Fortov, M. Thoma, M. Pustyl'nik, M. Fink, G. Morfill*, Elongated dust clouds in uniform DC positive column of low pressure gas discharge // *Plasma Sources Science and Technology* 25 035009 (2016);
18. *A. V. Zobnin, A. D. Usachev, O. F. Petrov, V. E. Fortov, M. H. Thoma, M. A. Fink*, Two-

dimensional positive column structure with dust cloud: Experiment and nonlocal kinetic simulation // *Physics of Plasmas* 25, 033702 (2018);

19. A. V. Zobnin, A. D. Usachev, A. M. Lipaev, V. I. Molotkov M. Y. Pustyl'nik, M. A. Thoma, H. M. Thomas, Charges of a single grain and the grain in a cloud: Theory and experiments // *Journal of Physics: Conference Series* 1556, 012078 (2020);

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук** (г. Москва ул. Профсоюзная 84/32) д.ф.-м.н., профессор Попель С. И. Отзыв положительный, без замечаний.

**2. Казахский национальный университет им. Аль-Фараби**, (Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби 71) проректор по научно -инновационной деятельности д.ф.-м.н., профессор, академик НАН РК Рамазанов Т. С. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. Пылевая структура, представленная на рисунке 3 слева, выглядит более упорядоченной, чем структура на рисунке 2 (в). С чем это связано? Действительно ли пылевые структуры из полидисперстных частиц имеют большую степень упорядоченности, чем образованные монодисперсными частицами?

2. На рисунке 8 не указаны погрешности измерений, что не позволяет судить каков вклад в разброс точек от эффекта проецирования на плоскость и от погрешности измерений смещений частиц.

3. В формуле на странице 18 фигурируют переменные помеченные тильдой, но не дано их определения, если это безразмерные параметры, то неясно на что они нормированы.

4. На рисунке 18 (страница 26) линии, соответствующие результатам расчётов, очень тонкие и трудно различимы.

**3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН** (г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1) в.н.с., д.ф.-м.н. Швейгерт И. В. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. В выводах по первой главе говорится об упорядоченных структурах, но ни где не дано анализа степени упорядоченности, не ясно наблюдались ли плазменно-пылевые кристаллы, или структуры жидкостного типа.

2. В численных расчётах, представленных во второй главе, эффект отражения электронов от поверхности частиц не учитывался, тем не менее говорится о хорошем согласии с экспериментальными измерениями зарядов частиц, а в пятой главе утверждается, что отражение электронов достигает 50%. Как это согласуется?

**4. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Института нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук** (г. Москва, Ленинский проспект 29) г.н.с., д.ф.-м.н. Лебедев Ю. А. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. Зондовые измерения параметров плазмы проводились в отсутствие пылевых частиц в чистом инертном газе, но экспериментально наблюдалось плазменное травление пластиковых микросфер. Как влияет поступление молекулярных примесей на параметры плазмы и заряды частиц?

2. Некоторые переменные, встречающиеся в формулах и таблицах, например «ню» с тильдой,  $S_{s5}$ ,  $S_{s3}$ ,  $k_{s5}$ ,  $k_{s3}$ , не описаны в тексте автореферата.

**5. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук** (г. Москва, Ленинский пр-т 53 стр. 4) д.ф.-м.н., профессора Очкин В. Н. Отзыв положительный, с замечаниями:

1. На некоторых рисунках, например 10, 17 и 18, линии очень тонкие и плохо отпечатаны.

2. Неясно, в какой мере предположение об изотропности плазмы вокруг пылевой частицы, использованное в расчётах по определению её заряда, может применяться в плазме тлеющего разряда, особенно стратифицированного, в котором в области левитации пылевых частиц имеет место сильное нарушение квазинейтральности плазмы и

присутствуют сильные электрические поля, вызывающие сильный дрейф ионов.

6. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцина (г. Москва, Ленинские горы д. 1 стр. 2) д.ф.-м.н. Паль А. Ф. Отзыв положительный, с замечанием: при использовании полидисперсных частиц окиси церия в гелии и неоне при давлениях 150 -300 Па наблюдалось формирование пылевых облаков не только у нижней, но и у верхней границы светящейся области разряда. К сожалению, автор оставил без обсуждения такое интересное и малоизученное явление.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Глова Александр Фёдорович является ведущим ученым в области физики лазеров, а также физики и химии плазмы, образующейся при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью и при оптическом пробое.

1. Glova A. F., Lysikov A. Yu., Nelyubin S. S., Klochkov I. D., Baldaev L. Kh., Novinkin Yu. A., Stogov M. A.; Controlled processes at laser coating deposition // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1696, p. 012021 (2020);

2. Gvozdev S. V., Glova A. F., Dubrovskii V. Yu, Durmanov S. T., Krasnyukov A G. Lysikov A. Yu., Smirnov G. V., Pleshkov V. M.; Attenuation of laser radiation by the flame of burning hydrocarbons and efficiency of remote cutting of metals // Journal of Physics: Conference Series, Volume 941, p. 012033 (2018);

3. Glova A. F., Lysikov Yu. A., Maljuta D. D., Nelyubin S. S., Peretyatko P. I., Ryzhkov Y. F.; Effect of radiation refraction on characteristic of a CW optical discharge // Journal of Physics: Conference Series, Volume 747, p. 012011 (2016).

- д.ф.-м.н., Карасёв Виктор Юрьевич является признанным специалистом в области физики пылевой плазмы, известен исследованиями вращения плазменно-пылевых структур в магнитном поле и исследованиями модификации поверхности пластиковых частиц в плазме разряда постоянного тока.

1. Е. С. Дзлиева, С. И. Павлов, Л. А. Новиков, И. Ч. Машек; Пылевая плазма в сильно неоднородном магнитном поле // Письма в журнал технической физики, т. 46, вып. 8, стр. 28 (2020);

2. Е. С. Дзлиева, С. И. Павлов, Л. А. Новиков, И. Ч. Машек; Пороговый характер раскручивания объёмного пылевого кластера в магнитном поле // Журнал технической физики, т. 90, с. 202 (2020);

3. Siasko A. V., Golubovskii Yu. B., Karasev V. Yu.; About the photoemission of electrons from the surface of a spherical dust particle in gas discharge plasma // Plasma Sources Science and Technology 30, p. 065030 (2021);

- д.ф.-м.н. Сухинин Геннадий Иванович является крупным специалистом по физике газового разряда и комплексной плазме.

1. Sukhinin G. I., Fedoseev A.V., Salnikov M. V.; Effect of ion mean free path length on plasma polarization behind a dust particle in an external electric field // Contributions to Plasma Physics 59, p. 201800152 (2019);

2. Fedoseev A. V., Demin N. A., Salnikov M. V., Sukhinin, G. I.; Non-local electron kinetics around the cloud of dust particles // Contributions to Plasma Physics 59, p. 201800181 (2019);

3. Salnikov M. V., Sukhinin G. I.; Distribution of ion velocity near an isolated dust particle // Journal of Physics: Conference Series 1677, p. 012154 (2020).

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» является ведущей научной организацией, в которой проводятся исследования в области физики плазмы, включая физику низкотемпературной плазмы и комплексной плазмы. Комплексная и неидеальная плазма является важными направлениями исследований теоретического отдела.

1. Игнатов А. М.; Влияние невзаимных сил на устойчивость пылевых кластеров // Физика плазмы Т. 47, №5, с. 391 (2021);

2. Игнатов А. М.; Устойчивость планарного плазменного кристалла // Физика плазмы Т. 46, №4, с. 358 (2020);

3. Скворцова Н. Н., Майоров С. А., Малахов Д. В., Степахин В. Д., Образцова Е. А., Кенжебекова А. И., Шишилов О. Н.; О пылевых структурах и цепных реакциях, возникающих над реголитом при воздействии излучения гиротрона // Письма в ЖЭТФ Т. 109, №7, с. 452 (2019).

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- Найдены условия формирования плазменно-пылевых структур в высокочастотном разряде индукционного типа, показано, что трёхмерные структуры из частиц микронного размера образуются вблизи границы свечения разряда, или у стенки разрядной камеры;
- экспериментально исследована сепарация пылевых частиц по размерам, определена скорость плазменного распыления полимерных микросфер;
- обнаружено и исследовано развитие пыли-акустической неустойчивости в плазменно-пылевых структурах в высокочастотном разряде индукционного типа;
- на основе экспериментов и численных расчётов показано, что столкновения ионов с нейтральными атомами плазмообразующего газа оказывают сильное влияние на равновесные заряды пылевых частиц в квазиизотропной газоразрядной плазме даже когда длина свободного пробега ионов превышает радиус Дебая;
- рассчитаны воль-амперные характеристики ионного тока на малый притягивающий зонд в слабоионизованной изотропной плазме для различных частот столкновений ионов с нейтралами и предложены аналитические аппроксимации полученных зависимостей;
- разработана численная модель продольно- и радиально-неоднородного положительного столба разряда постоянного тока с нелокальной кинетикой электронов и пылевой компонентой;
- для тестирования модели проведены экспериментальные измерения интенсивностей свечения плазмы неона и концентраций метастабильных атомов в разряде постоянного тока в трубке со ступенчатым изменением радиуса;
- обнаружено, что протяжённая плазменно-пылевая структура вызывает значительное увеличение яркости свечения плазмы положительного столба разряда постоянного тока вследствие влияния пылевой компоненты на электрическое поле разряда;
- обнаружена стратификация первоначально однородного положительного столба под влиянием пылевого облака;
- показано, что для правильного описания ионизационно-рекомбинационного равновесия в плазменно-пылевой структуре необходимо учитывать отражение электронов от поверхности полимерных пылевых частиц.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

- исследовано влияние столкновений ионов с нейтральными атомами на ионный ток на пылевую частицу малого размера и её равновесный заряд; это влияние оказалось неожиданно сильным в условиях, когда на первый взгляд допустимо использование бесстолкновительного приближения;
- разработана численная модель продольно- и радиально-неоднородного положительного столба разряда постоянного тока с нелокальной кинетикой электронов и пылевой компонентой, которая позволяет описывать взаимодействие разряда с пылевым облаком самосогласованным образом.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается** тем, что:

- в работе применены оригинальные методы экспериментального определения зарядов пылевых частиц и пространственного распределения частиц по размерам;
- получены данные о влиянии пылевой структуры на распределение параметров плазмы в положительном столбе разряда постоянного тока, обнаружен эффект стратификации и усиления свечения разряда;

Результаты, представленные в работе могут найти применение в исследованиях специалистов, занимающихся изучением пылевой плазмы, её свойств и практических приложений. Представляется целесообразным использовать результаты работы в Объединенном институте высоких температур РАН, в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, в Московском энергетическом институте, в Санкт-Петербургском государственном университете, в Московском физико-техническом институте, в Институте химической физики РАН, в Московском инженерно-физическом институте, в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, в Институте проблем механики РАН и других научных организациях.

**Оценка достоверности результатов** исследований показывает, что достоверность полученных результатов подтверждается использованием различных методов измерения, сравнением экспериментальных данных с результатами численных моделей, а также подтверждением основных представленных в работе результатов исследованиями других авторов.

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии постановке и проведении экспериментов, интерпретации их результатов, разработке численных моделей и проведении расчётов.

Апробация результатов исследования проводилась на международных конференциях «Уравнения состояния вещества» (Терскол 2000, Эльбрус 2014, 2018), конференциях «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество» (Эльбрус 2003, 2009, 2011, 2013), всероссийских конференциях по физике низкотемпературной плазмы (Петрозаводск 2001, 2004), на международных конференциях «Пылевая плазма в приложениях» (Одесса, Украина 2007, 2010), Юбилейной конференции ОИВТ РАН (Москва, 2010), VII International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (Garmisch-Partenkirchen, Germany 2011); и на различных сессиях, совещаниях и семинарах.

Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

На заседании от 15.09.2021г. диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, решение научной проблемы, имеющей важное политическое, социально-экономическое значение, новые научно-обоснованные технические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, присудить Зобнину Андрею Вячеславовичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 (1.3.9) — физика плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы» (из них 9 - очно) и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (из них 7 - очно), участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 21, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)  
д.ф.-м.н., профессор

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)  
д.ф.-м.н.

15.09.2021г.



 Андреев Н.Е.

 Васильев М.М.