

Учреждение Российской академии наук  
Объединенный институт высоких температур РАН

На правах рукописи



Ворона Назар Александрович

**Зарядка макрочастиц и явления переноса  
в плазменно-пылевых структурах  
при пучковых воздействиях**

01.04.08 – Физика плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в *Учреждении Российской академии наук  
Объединенном институте высоких температур РАН.*

Научный руководитель: *член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор Петров Олег Федорович*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук  
Дьячков Лев Гаврилович*

*доктор физико-математических наук  
Паль Александр Фридрихович*

Ведущая организация: *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ)*

Защита состоится *29 декабря 2010 года в 10:00* на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 при *Учреждении Российской академии наук Объединенном институте высоких температур РАН*, расположенном по адресу: *Москва, 125412, Ижорская ул., 13, стр. 2, ОИВТ РАН*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ОИВТ РАН.*

Автореферат разослан *22 ноября 2010 года.*

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя диссертанта.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.110.02

*доктор физико-математических наук*



*Хомкин А. Л.*

## Общая характеристика работы

Плазма, содержащая заряженные твердые или жидкие макроскопические частицы называется пылевой или комплексной, аэрозольной, коллоидной, запылённой, плазмой с конденсированной дисперсной фазой и т. п. В зависимости от механизмов зарядки (потoki ионов и электронов, фото-, термо-, вторичная электронная эмиссия) частицы в такой плазме приобретают отрицательный или положительный заряд [1]. Пылевая плазма широко распространена в природе — она обнаружена на поверхностях планет и их спутниках, в планетарных кольцах, хвостах комет, межпланетных и межзвёздных облаках [2]. Пылевая плазма обнаружена также вблизи искусственных спутников, космических станций [3, 4], в пристеночной области установок управляемого термоядерного синтеза [5, 6], камерах для производства элементов микроэлектроники [7–9] и др.

Присутствие заряженных макрочастиц в плазме существенным образом сказывается на коллективных процессах. Наличие пылевых образований изменяет характерные пространственные и временные масштабы в плазме. Характерные временные масштабы динамических процессов, связанных с пылевой компонентой, находятся в диапазоне  $\sim 10$ – $100$  Гц, при этом достаточно большие размеры ( $\sim 10^{-2}$ – $10^2$  мкм) пылевых частиц дают возможность проводить визуальное наблюдение отдельных макрочастиц, в том числе их пространственное положение, траектории движения и т. д. Это позволяет исследовать явления, происходящие в пылевой плазме на кинетическом уровне.

Частицы микронных размеров в плазме не только изменяют зарядовый состав плазмы, но и приводят к возникновению новых эффектов в системе, например, связанных с диссипацией и рекомбинацией плазмы на поверхности частиц, флуктуацией заряда частиц и др.

### **Актуальность темы исследований**

В лабораторных условиях пылевая плазма была впервые обнаружена Ленгмюром ещё в 1920-х годах [10]. Однако её активное исследование началось лишь в 70-х и 80-х годах прошлого века в связи с развитием целого ряда приложений, таких как электрофизика и электродинамика продуктов сгорания ракетных топлив, электрофизика рабочего тела магнетогидродинамических генераторов на твёрдом топливе, физика пылегазовых облаков в атмосфере и др. Пылевые частицы играют исключительно важную роль в технологиях плазменного напыления и травления в микроэлектронике, а также при производстве тонких пленок и наночастиц. Для управления этими процессами необходимы знания о транспортных свойствах систем пылевых частиц, о влиянии пылевых частиц на параметры плазмы, о механизмах их зарядки и т. д.

Заряд пылевых частиц может иметь большие значения ( $\sim 10^2$ – $10^5$  зарядов электрона для частицы микронного радиуса). В результате средняя кулоновская энергия взаимодействия частиц может намного превосходить их среднюю тепловую энергию, что означает возникновение сильнонеидеальной плазмы. В пылевой плазме можно наблюдать переходы от неупорядоченного газообразного состояния к жидкостным и кристаллическим структурам.

Образование кристаллических структур в различных типах пылевой плазмы вызвало значительный рост интереса к этой области научных исследований. Возможность кристаллизации пылевой подсистемы в неравновесной газоразрядной плазме была показана в работе Икези ещё в 1986 году [11]. Одни из первых экспериментальных наблюдений упорядоченных структур пылевых частиц были выполнены в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда [12, 13]. Плазменно-пылевые структуры также были обнаружены в плазме разряда постоянного тока [14], термической плазме при атмосферном давлении [15] и ядерно-возбуждаемой пылевой плазме [16]. Сегодня физика пылевой плазмы является бурно развивающейся областью исследований, которая включает как фундаментальные задачи физики плазмы, гидродинамики, кинетики фазовых переходов, нелинейной физики, физики твердого тела и астрофизики, так и прикладные.

### **Цель диссертационной работы**

Основной целью работы является экспериментальное исследование эффектов воздействия электронного пучка кэВ-энергий на пылевые частицы, а также экспериментальное исследование явлений переноса в плазменно-пылевых структурах при воздействии на структуры лазерного и электронного пучков.

### **Научная новизна**

1. Получены новые экспериментальные данные о коэффициентах сдвиговой вязкости для плазменно-пылевых жидкостных структур в широком диапазоне значений параметра неидеальности.
2. Получены новые экспериментальные данные о коэффициентах теплопроводности и температуропроводности для плазменно-пылевых структур при воздействии на структуры электронного пучка.
3. Разработана и создана экспериментальная установка и диагностический комплекс для изучения воздействия пучка электронов кэВ-энергий на пылевые частицы.
4. Предложена новая экспериментальная методика сверхвысокой зарядки пылевых частиц при воздействии электронного пучка кэВ-энергий.

5. При воздействии электронного пучка впервые получены значения заряда на частицах, на порядки превышающие характерные значения заряда частиц в газовых разрядах низкого давления.

### **Практическая значимость**

Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением физических свойств сильнонеидеальных кулоновских систем, в частности сильнонеидеальной плазмы. Исследования транспортных характеристик пылевой подсистемы в неидеальной плазме представляет фундаментальный интерес. Так, представленные экспериментальные исследования процессов переноса импульса и теплопереноса могут играть существенную роль в проверке существующих и развитии новых феноменологических моделей в теории жидкости. Методика сверхвысокой зарядки пылевых частиц может быть использована для создания и исследования сильнонеидеальных плазменно-пылевых систем.

Результаты данной работы могут также способствовать развитию ряда интересных приложений, связанных с созданием дисперсных композитных материалов, сепарацией частиц по размерам, а также с разработкой космических электростатических двигателей нового поколения.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных исследований вязкопластических свойств жидкостных плазменно-пылевых образований.
2. Результаты экспериментальных исследований процессов теплопереноса в плазменно-пылевой жидкости при воздействии электронного пучка.
3. Экспериментальная установка и диагностический комплекс для изучения воздействия пучка электронов кэВ-энергий на пылевые частицы.
4. Результаты экспериментального исследования зарядки пылевых частиц электронным пучком кэВ-энергий.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: XLVI–XLVIII, XLIX и 50–53 Научных конференциях «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» (Москва, Долгопрудный, 2003–2010); XX–XXV International Conferences on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter and on Equations of State for Matter (Эльбрус, 2005–2010); Научно-координационных сессиях «Исследования неидеальной плазмы» (Москва, 2006–2009); IV Российском семинаре «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ

и окружающей среды» (Москва, 2003); XXXIII Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2006); XII Школе молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (Звенигород, 2008); 10-й Юбилейной международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2009); 1<sup>st</sup>–3<sup>rd</sup> International Conferences on the Physics Dusty and Combustion Plasmas (Odessa, Ukraine, 2004, 2007, 2010); 31<sup>st</sup>–33<sup>rd</sup>, 35<sup>th</sup>, 36<sup>th</sup> European Physical Society Conferences on Plasma Physics (2004–2006, 2008, 2009); 6<sup>th</sup> Workshop on Fine Particle Plasmas (Toki, Japan, 2005); 15<sup>th</sup> Symposium on Applications of Plasma Processes (Podbanske, Slovakia, 2005); 4<sup>th</sup>, 5<sup>th</sup> International Conferences on the Physics of Dusty Plasma (2005, 2008); International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems (Moscow, 2005); 13<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics (Kiev, Ukraine, 2006); 8<sup>th</sup> Workshop on Fine Particle Plasmas Generation, Growth, Behavior, and Control of Fine Particles in Plasmas (Toki, Japan, 2007); Indo-Russian Workshop on High Energy Density Physics for Innovative Technology and Industry Applications (Pune, India, 2008); 13<sup>th</sup> International Conference on Physics of Non-Ideal Plasmas (Chernogolovka, 2009); VI International conference on Plasma Physics and Plasma (Minsk, Belarus, 2009) и др.

Автор является победителем конкурса Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям и Федерального агентства по образованию в рамках программы «Участник молодёжного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.») в 2007 году.

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 33 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [1–5], 28 статей в сборниках трудов конференций [6–33] <sup>1</sup>.

### **Личный вклад автора**

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 115 страниц, из них 103 страницы текста,

---

<sup>1</sup> см. Список публикаций

включая 33 рисунка. Библиография включает 101 наименование на 12 страницах.

### **Благодарности**

Автор искренне признателен научному руководителю д. ф.-м. н., член-корр. РАН, проф. Петрову О. Ф. за постановку задач и постоянное внимание к работе. Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую благодарность коллеге-экспериментатору и другу к. ф.-м. н. Гаврикову А. В. за переданный опыт, энтузиазм и постоянную поддержку при выполнении работы и подготовке диссертации, д. т. н., проф. Васильеву М. Н. за предоставленную возможность проведения исследований на экспериментальном стенде, практические советы и обсуждение результатов, д. ф.-м. н. Ваулиной О. С. за полезные обсуждения, Сидорову В. С., Тимирханову Р. А., Манохину А. А. за помощь в проведении экспериментов, в обработке экспериментальных данных, в создании экспериментального стенда.

### **Содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **Первой главе** представлен краткий обзор экспериментальных работ по исследованию лабораторной пылевой плазмы в газовых разрядах низкого давления при внешних воздействиях. Исследование различных внешних воздействий на плазменно-пылевые структуры представляет большой интерес по нескольким причинам. Воздействия, вносящие незначительные искажения в фоновую плазму, могут быть использованы в качестве диагностических средств. Внешние воздействия могут также использоваться для управления пространственным положением и упорядоченностью плазменно-пылевых структур. Кроме того, внешние воздействия могут быть использованы для введения в плазменно-пылевые структуры дополнительной энергии с целью изучения их поведения в экстремальных условиях. Акцент сделан на следующие интенсивно развивающиеся в последнее время направления исследований: плазменно-пылевые структуры при воздействии магнитного поля, при охлаждении до криогенных температур, при воздействии лазерного излучения и при воздействии электронного пучка.

В разделе **1.1** рассмотрены работы по исследованию динамики плазменно-пылевых структур при воздействии магнитных полей в диапазоне от 0 до 2,5 кГс. Описаны эффекты, наблюдаемые в экспериментах: вращение пылевых структур и пороговый характер вращения; зависимости угловой ско-

рости вращения от величины магнитного поля, приложенного к электродам потенциала, мощности разряда и изменение направления вращения; разлет пылевых частиц из центральной в пристеночную область и падение на стенки газоразрядной камеры. Рассмотрены возможные причины упомянутых эффектов. Отмечено новое направление исследований по созданию структур заряженных пылевых частиц с чисто кулоновским потенциалом взаимодействия.

Раздел **1.2** посвящен ключевым работам по созданию плазменно-пылевых структур при понижении температуры нейтрального газа до криогенных температур. Отмечены характерные особенности поведения пылевых образований при температурах жидкого азота (77 К) и ниже до температур жидкого гелия (4,2 К): наблюдение протяженных структур, разделение их на несколько частей, развитие пылезвуковых неустойчивостей, увеличение плотности структур, их вращение и др. Рассмотрены механизмы изменения неидеальности пылевой подсистемы при понижении температуры.

Краткий обзор работ по исследованию пылевой плазмы с помощью воздействия лазерным излучением приведен в разделе **1.3**. Параметры лазерного излучения (плотность мощности, длительность воздействия, длины волн) могут варьироваться в широких пределах, а сам характер воздействия не приводит к заметным изменениям распределения электрического поля в исследуемой плазменно-пылевой системе, что позволяет использовать лазерное излучение как для оптических методов диагностики пылевой плазмы, так и для диагностики, связанной с манипуляцией пылевыми структурами, отдельными или несколькими пылевыми частицами. Рассмотрены основные физические механизмы манипуляции частицами, перечислены некоторые важнейшие данные полученные с помощью воздействия лазерного излучения: данные о силах ионного увлечения, заряде частиц, волновых процессах, процессах переноса и др.

Работа, посвященная исследованию процессов воздействия электронного пучка на упорядоченные пылевые структуры в тлеющем и ВЧ разрядах низкого давления, рассмотрена в разделе **1.4**. В работе на качественном уровне описан характер и приведены рассуждения о возможных механизмах воздействия, создан задел для дальнейшей работы.

Раздел **1.5** содержит заключение об эффективности исследований пылевой плазмы при внешних воздействиях, в частности при воздействии электронного пучка.

**Вторая глава** посвящена исследованию процессов переноса импульса в пылевой плазме при воздействии лазерного излучения. С помощью лазерного излучения в пылевой плазме удастся инициировать различного рода течения, в которых характеристики потока частиц могут варьироваться в ис-

ключительно широком диапазоне. Однако основные характеристики рассматриваемой среды, позволяющие перейти от описательного изучения наблюдаемых явлений к их детальному анализу, остаются малоизученными.

В разделе **2.1** кратко рассмотрены известные экспериментальные исследования по оценке вязкости плазменно-пылевой жидкости. Описан метод определения параметров ламинарного потока жидкостной структуры и полученные экспериментальные данные: зависимость коэффициента сдвиговой вязкости от величины сдвигового напряжения и пороговый характер течения, что свидетельствует о неньютоновом поведении плазменно-пылевой жидкости. Обоснована важность продолжения экспериментальных исследований, в частности получения зависимости вязкостных свойств плазменно-пылевых образований от степени упорядоченности структуры.

Описание экспериментальной установки и техники эксперимента приведены в разделе **2.2** (рис. 1). В работе рассмотрены три серии экспериментов с жидкостными пылевыми структурами разной степени упорядоченности. Одной из основных характеристик системы многих взаимодействующих частиц является параметр неидеальности  $\Gamma$ , определяемый как отношение потенциальной энергии взаимодействия между соседними частицами к их средней кинетической энергии [1]. Помимо изменения сдвиговой вязкости при увеличении мощности лазерного излучения в области возмущения возрастает отличие параметра неидеальности от параметра неидеальности невозмущенной структуры. Поэтому для корректности восстановления данных в каждом из экспериментов определялась пороговая мощность лазера, ниже которой течение в структуре не возникало, а для инициирования течения выбиралась мощность лазера, близкая к пороговой. Видеосъёмка пылевых частиц осуществлялась монохромной ССД-камерой, на ПЗС матрицу которой попадал свет лазера подсветки, рассеянный макрочастицами пылевого облака.

Раздел **2.3** посвящен технике обработки экспериментальных данных, которая используется также и во второй главе. Приведено описание алгоритма фильтрации изображений от различного рода помех, процесса корректного нахождения координат частиц и их траекторий, способа восстановления кинетической температуры частиц и их концентрации, процесса восстановления парных корреляционных функций и эффективного параметра неидеальности  $\Gamma^*$  [17], связанного с обычным параметром неидеальности  $\Gamma$  при помощи следующего выражения:  $\Gamma^* = \Gamma \exp(-k)(k^2/2 + k + 1)$ , где  $k$  — структурный параметр, который равен отношению среднего межчастичного расстояния к радиусу экранирования.

Обработка и анализ экспериментальных данных, а также сравнение полученных результатов с модельными данными приведены в разделе **2.4**. Анализ данных показал, что во всех сериях экспериментов в системе присутствовал

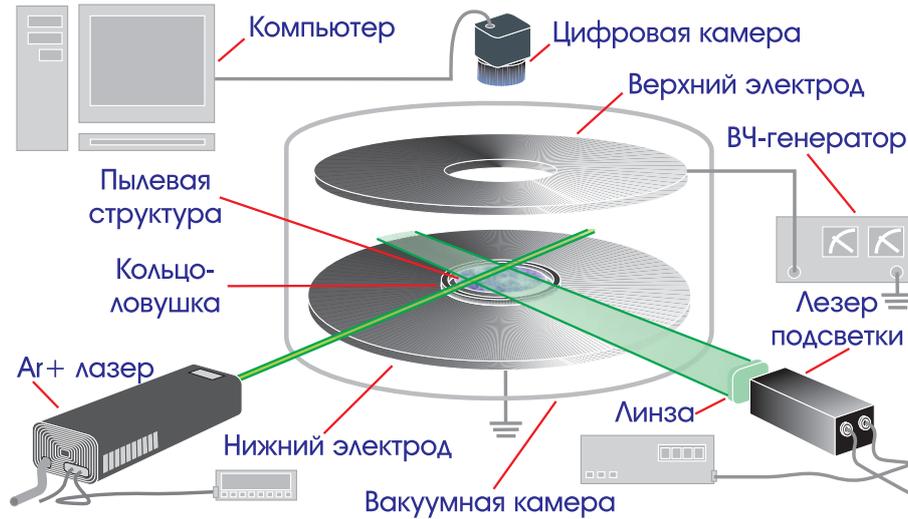


Рис. 1. Схема постановки эксперимента.

ближний порядок, а значения параметра неидеальности не превышали критического значения, при котором пылевая структура из жидкой фазы переходит в кристаллическую (рис. 2). Рассмотрение траекторий пылевых частиц позволило сделать вывод о ламинарном характере течения плазменно-пылевой структуры и построить распределения скоростей  $V(r)$  пылевых частиц вдоль диаметра пучка лазера. Определение коэффициента вязкости  $\eta$  плазменно-пылевой жидкости осуществлялось путем сравнения экспериментального профиля скорости с профилем скорости вязкого ламинарного течения жидкости в цилиндрически симметричной трубе, описываемого уравнением Навье-Стокса [18] в цилиндрической симметрии:

$$\eta \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = -F(r), \quad (1)$$

где  $F(r)$  — объемная сила, вызывающая течение, связанная линейной зависимостью с мощностью луча лазера. Таким образом были получены коэффициенты сдвиговой вязкости  $\eta$  для плазменно-пылевых жидкостных структур в широком диапазоне значений параметра неидеальности  $\Gamma$ .

В разделе 2.4 сформулированы выводы ко второй главе.

В **Третьей главе** описаны исследования воздействия электронного пучка с энергией электронов 25 кэВ на пылевые структуры в плазме ВЧ разряда низкого давления. Воздействие электронного пучка приводит к изменению параметров плазмы, что в свою очередь приводит к изменению параметров пылевых образований: кинетической температуры частиц, концентрации, параметра неидеальности и др. Поэтому электронный пучок может использоваться для управления пространственным положением и упорядоченностью

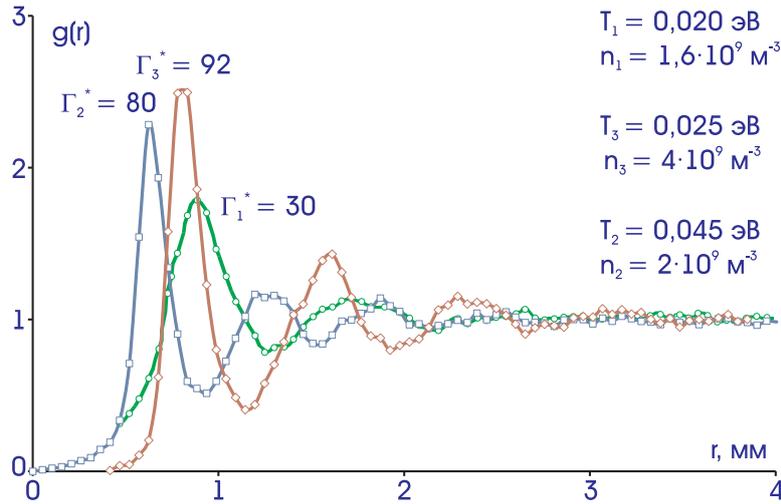


Рис. 2. Корреляционные функции  $g(r)$  структур и их эффективные параметры неидеальности  $\Gamma^*$ , кинетические температуры частиц  $T$  и их концентрации  $n$  для трёх серий экспериментов.

плазменно-пылевых структур и является уникальным и удобным инструментом для исследования процессов переноса тепла пылевой подсистемой.

В разделе **3.1** рассмотрено разнообразие эффектов воздействия электронного пучка при различных режимах его генерации: сфокусированного пучка, развернутого в различных плоскостях с частотой сканирования  $\sim 1\text{--}10^2$  Гц, модулированного по амплитуде синусоидальными, треугольными и П-образными импульсами различной частоты. В зависимости от режима работы удастся наблюдать такие эффекты, как притяжение частиц структуры электронным пучком, снос структуры из потенциальной ловушки, локальное изменение упорядоченности структуры, равномерный разогрев структуры и релаксационные процессы после отключения пучка.

Описание экспериментального стенда с электронной пушкой триодного типа [19], а также техники эксперимента по исследованию процессов теплопереноса представлены в разделе **3.2** (рис. 3). Во всех сериях экспериментов подведенный с одного из краев пылевого облака осесимметричный электронный пучок вызывал локальное возмущение, при этом пылевая система приходила в новое равновесное состояние, состоящее из двух фаз (высокотемпературной и низкотемпературной) с ярко выраженной границей раздела (рис. 4а).

Раздел **3.3** посвящен обработке и анализу экспериментальных данных, сравнению полученных результатов с модельными данными и экспериментальными данными для двумерных плазменно-пылевых систем. По видеоданным были построены пространственные распределения кинетической температуры, концентрации (рис. 4б, в) и плотности потока тепла (рис. 5а). При теплопроводности перенос тепловой энергии осуществляется в результате её

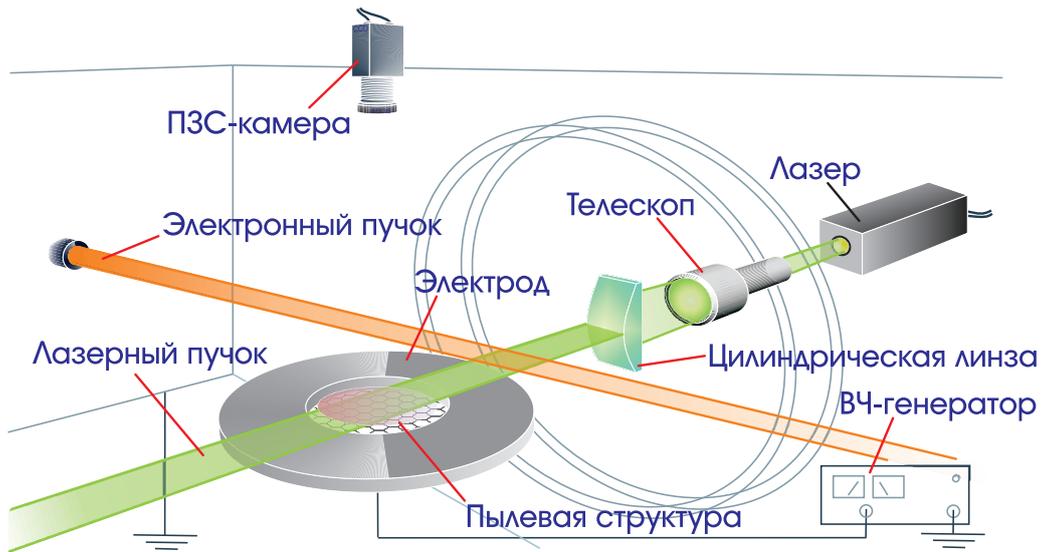


Рис. 3. Схема постановки эксперимента.

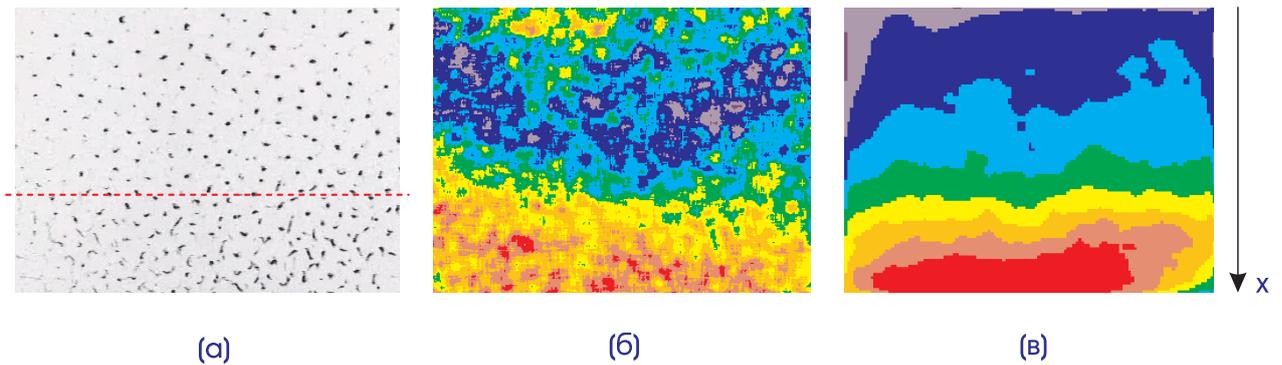


Рис. 4. (а) — кадр видеозаписи пылевой структуры с четко-выраженной высокотемпературной и низкотемпературной фазами (пунктиром обозначена граница раздела), (б) — пространственное распределение кинетической температуры частиц  $T$  и (в) — плотности частиц  $n$ .

непосредственной передачи от частиц, обладающих большей энергией, к частицам с меньшей энергией. Если передача тепла осуществляется путем теплообмена (конвекция отсутствует) и относительное изменение кинетической температуры частиц  $T_d$  на расстоянии длины свободного пробега частиц мало, плотность теплового потока  $\mathbf{q}$  (количество тепла, полученного телом, проходящего через единичную площадку за единицу времени) подчиняется закону Фурье [20]:

$$\mathbf{q} = -\chi \frac{\nabla T}{k_B}, \quad (2)$$

где  $\chi$  — коэффициент теплопроводности, не зависит от градиента темпера-

туры,  $k_B$  — константа Больцмана. В отсутствие возбужденных колебаний и вращения частиц вещества тепловой поток, переносимый частицами со скоростью  $\mathbf{V}$ , через площадку  $S$  слоя вещества (толщиной  $\delta x$ ) выражается как

$$\mathbf{q} = \frac{1}{2} \frac{\int \mathbf{V} M V^2 dN}{S \delta x}, \quad (3)$$

где  $N$  — число частиц в слое,  $M$  — масса частицы. Полагая энергию частиц равномерно распределенной по степеням свободы и пренебрегая диффузионными потоками, плотность потока тепла, распространяющегося в выделенном направлении  $x$ , можно найти как

$$q = \frac{3}{2} \frac{\int M V_x^3 dN}{S \delta x} \approx \frac{3}{2} \rho (\langle V_x^3 \rangle_+ - \langle V_x^3 \rangle_-)$$

где  $G_{+(-)} = 1, 5 \rho \langle V_x^3 \rangle_{+(-)}$  — количество тепла, переносимого по (+) и против (-) направления потока через площадку толщиной  $\delta x$ , соответственно,  $\rho = M n_d$ ,  $n_d$  — концентрация пылевых частиц. Тогда для оценки коэффициента теплопроводности можно записать

$$\chi \approx \frac{3}{2} n_d \delta x k_B \frac{(\langle V_x^3 \rangle_+ - \langle V_x^3 \rangle_-)}{(\langle V_x^2 \rangle_+ - \langle V_x^2 \rangle_-)}, \quad (4)$$

а коэффициент температуропроводности найти, как

$$\theta = \frac{\chi}{\rho c_p} \cong \frac{2\chi}{5n_d k_B}, \quad (5)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении  $P$ . На базе экспериментально полученных величин теплового потока по закону Фурье были рассчитаны коэффициент теплопроводности  $\chi$  и коэффициенты температуропроводности  $\theta$  пылевой компоненты.

В разделе **3.4** изложены выводы к третьей главе.

**Четвертая глава** содержит описание исследований зарядки частиц при прямом воздействии электронного пучка с энергией электронов 25–30 кэВ.

В разделе **4.1** приведено описание разработанного и созданного электронно-лучевого комплекса с использованием источника электронов кэВ-энергий с плазменным эмиттером [21], для исследования плазменно-пылевых образований и процессов, протекающих в них при воздействии электронного пучка. Представлены основные характеристики и возможности системы генерации и управления электронного пучка, системы регулирования расхода газов и поддержания давления, системы ввода частиц в реакционный объем и регистрации их движения. Электронный источник позволяет генерировать

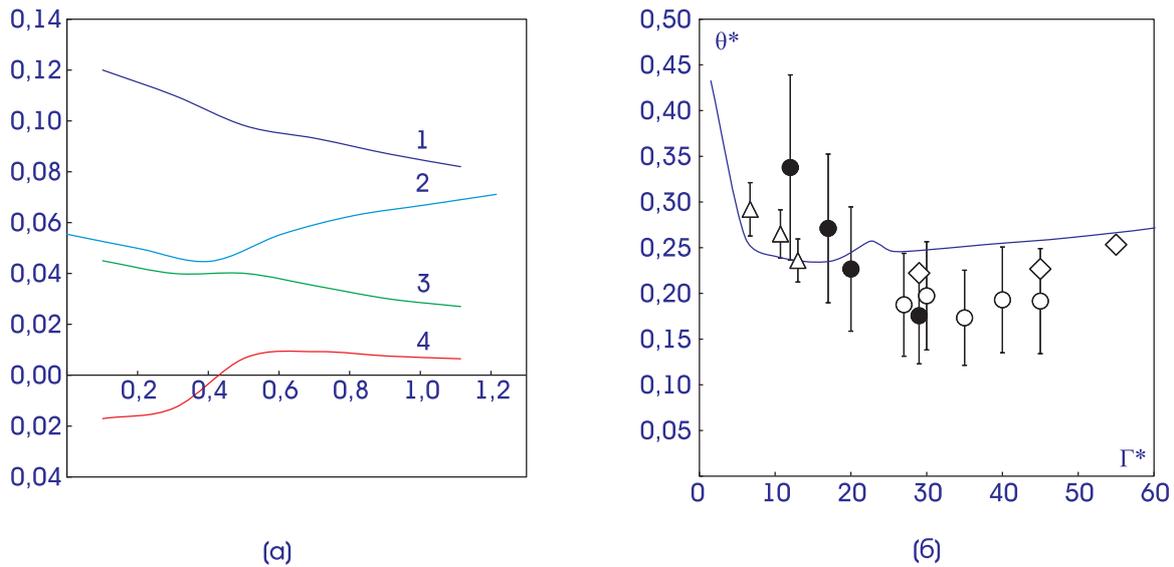


Рис. 5. (а) — усредненные зависимости измеренных параметров от расстояния  $x$  до края видео кадра (см. рис. 4а) (1 — межчастичное расстояние  $r_d$ , см; 2 — кинетическая температура  $T$ , эВ; 3 — параметр неидеальности  $\Gamma^*/1000$ ; 4 — плотность теплового потока делённая на плотность структуры  $q/\rho$ , см<sup>3</sup>/с<sup>3</sup>;  $x$  возрастает в направлении к электронному пучку);

(б) — зависимость нормированного коэффициента температуропроводности  $\theta^*$  от параметра неидеальности  $\Gamma^*$  для численного моделирования (линия), в экспериментах с электронным пучком (● — пластиковые частицы (МФ), плотность тока пучка  $j_e = 0,05$  мА/мм<sup>2</sup>; ○ — МФ,  $j_e = 0,1$  мА/мм<sup>2</sup>; ◇ — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $j_e = 0,1$  мА/мм<sup>2</sup>) и в экспериментах газоразрядной плазме (△ — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в стационарном случае.

электронный пучок в непрерывном или импульсном режиме с током пучка 1–100 мА и ускоряющим напряжением 30–50 кэВ. Также в разделе изложена методика эксперимента по исследованию зарядки частиц (рис. 6). Пылевые частицы инжектировались при помощи специальной системы вброса непосредственно в реакционную область, где они взаимодействовали с электронным пучком. В результате воздействия пучка электронов наблюдался интенсивный разлет частиц (рис. 7а, в).

Две серии экспериментов с частицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> размером 100 мкм подробно рассмотрено в разделе 4.2. Анализ видеоизображений, полученных в ходе экспериментов, позволил установить характерные скорости разлета макрочастиц (рис. 7). В разделе проведён анализ сил, действующих на частицу в электронном пучке: гравитационных сил и сил трения частиц о нейтралы газа; сил увлечения электронами пучка и сил, связанных с нагревом частиц, электрических сил взаимодействия заряженных частиц. Особенность разлета частиц и приведённые оценки показывают, что при взаимодействии с электронным пучком, пылевые частицы приобретают значительный заряд, который и приводит к их разлету за счет электрического взаимодействия друг с другом,

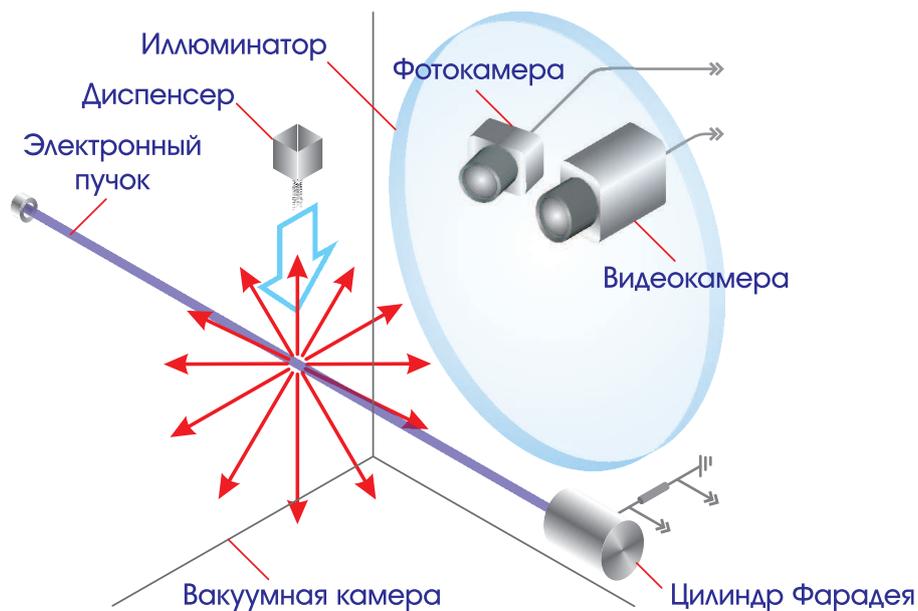


Рис. 6. Схема постановки эксперимента.

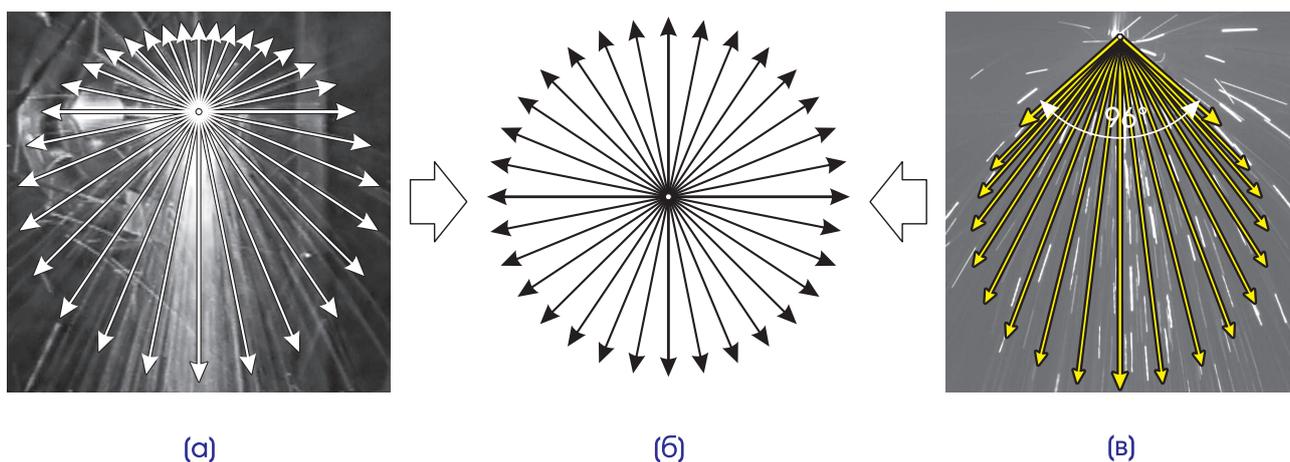


Рис. 7. Кадры видеозаписи и диаграммы скоростей разлета макрочастиц:  
 (а) — разлет частиц в первой серии экспериментов (скорости разлета 1,5–4,5 м/с на расстоянии 10 см от пучка);  
 (б) — восстановленные диаграммы скоростей разлета макрочастиц (в обоих случаях наблюдалось изотропное распределение частиц по скоростям с абсолютным значением 3 м/с (а) и 0,5 м/с (б));  
 (в) — разлет частиц во второй серии экспериментов (скорости разлета 0,3–1,2 м/с на расстоянии 5 мм от пучка).

причем эта сила взаимодействия существенно превышает другие силы действующие на частицу.

Раздел 4.3 содержит анализ механизма зарядки пылевых частиц электронным пучком. Анализ данных исключает влияние на зарядку вторичной электронной эмиссии, т. к. для оксида алюминия при энергиях первич-

ных электронов, реализованных в экспериментах, коэффициент вторичной эмиссии электронов становится существенно меньше единицы. Длина пробега электронов в материале частиц не превышает 3,4 мкм, поэтому конечные размеры макрочастиц в условиях эксперимента также не приводят к заметному увеличению коэффициента вторичной электронной эмиссии и вероятность поглощения электронов пучка, попадающих на частицу, близка к единице. Приведённые оценки изменения температуры пылевых частиц показывают, что максимальное изменение температуры частиц не превышает 440 К, и термоэмиссией электронов с поверхности частицы можно пренебречь. Все эти факторы приводят к отрицательной зарядке пылевых частиц.

Для оценки заряда, приобретаемого макрочастицей, была рассмотрена следующая модель: при зарядке в пучке все макрочастицы приобретают одинаковый отрицательный заряд  $Q$ , который при дальнейшем движении частицы не меняется. В электронном пучке из-за непрерывной подачи порошка постоянно находится  $N$  макрочастиц, каждая из которых уже имеет заряд  $Q$ , причем объем, занимаемый заряженными макрочастицами, рассматривается как сферический. Радиус заряженного шара из пылевых частиц  $r_b = 3$  мм совпадает с радиусом электронного пучка, т. к. область пересечения электронного пучка с потоком частиц занимает объем с характерным размером 6 мм. Уравнение движения макрочастицы массой  $m_d$  в проекции на ось перпендикулярную электронному пучку в рамках данной модели принимает следующий вид:

$$m_d \ddot{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{NQ^2}{r^2} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{Qk_b}{r}, \quad (6)$$

где  $r$  — расстояние до центра шара (и до оси пучка),  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $k_b$  — линейной плотность заряда электронного пучка. Рассмотрев  $Q$  в качестве вариационного параметра, было достигнуто наилучшее совпадение результатов численного интегрирования уравнения (6) и данных эксперимента, при этом значение заряда макрочастицы составило  $Q \approx 5 \cdot 10^7 e$ , где  $e$  — элементарный заряд. Сравнение времен зарядки и нахождения частицы в пучке показывает, что за время пролета через пучок электронов пылевая частица успевает полностью зарядиться.

В разделе 4.4 сформулированы выводы к четвёртой главе.

## Заключение

**В диссертации получены следующие основные результаты:**

1. Получены значения коэффициентов сдвиговой вязкости плазменно-пылевой жидкости при различных значениях параметра неидеальности в диапазоне  $\Gamma^* = 30\text{--}92$ . Характерные значения коэффициентов составили:  $\eta = 14 \cdot 10^{-10}$  Па·с при  $\Gamma^* = 30$ ,  $\eta = 4 \cdot 10^{-10}$  Па·с при  $\Gamma^* = 92$ . Выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования.
2. Продемонстрирована возможность управляемого воздействия электронного пучка на плазменно-пылевые структуры.
3. Получены коэффициенты теплопроводности и температуропроводности плазменно-пылевой жидкости в широком диапазоне параметров неидеальности ( $\Gamma^* = 14\text{--}55$ ) при локальном стационарном возмущении структуры плазмой, нарабатываемой электронным пучком с энергией электронов 25 кэВ. Характерные значения коэффициентов составили:  $\chi = 3,4 \cdot 10^{-14}$  эрг/с·К·см,  $\theta = 0,08$  см<sup>2</sup>/с. Выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования, а также с результатами экспериментальных данных, полученных для двумерных плазменно-пылевых структур.
4. Разработан и создан электронно-лучевой комплекс с использованием источника электронов с плазменным эмиттером для исследования эффектов воздействия пучка электронов с энергиями 30–50 кэВ на пылевые частицы.
5. Предложена методика одновременной сверхвысокой зарядки пылевых частиц при воздействии пучка электронов кэВ-энергий на частицы. Исследована динамика движения пылевых частиц при воздействии электронного пучка с энергией электронов 25–30 кэВ. Проведен анализ сил, действующих на частицу при воздействии электронного пучка.
6. Исследованы механизмы зарядки частиц воздействием электронного пучка. Получен заряд частиц при зарядке электронным пучком:  $Q = 10^6 e$  — для частиц микронного радиуса ( $Q = 5 \cdot 10^7 e$  — для частиц диаметром 100 мкм). Проведены оценки температуры нагрева пылевых частиц и времени их зарядки.

## Список публикаций

1. Gavrikov A., Shakhova I., Ivanov A. et al. Experimental study of laminar flow in dusty plasma liquid // *Phys. Lett. A*. 2005. Vol. 336, no. 4–5. Pp. 378–383.
2. Fortov V. E., Vaulina O. S., Petrov O. F. et al. Experimental study of the heat transport processes in dusty plasma fluid // *Phys. Rev. E*. 2007. Vol. 75, no. 2. P. 026403.
3. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Иванов А. С. и др. Вязкость плазменно-пылевой жидкости // *ЖЭТФ*. 2007. Т. 132, № 4. С. 941–948.
4. Gavrikov A., Goranskaya D., Ivanov A. et al. Investigation of non-Newtonian behavior of dusty plasma liquid // *J. Plasma Phys.* 2010. Vol. 76, no. 3–4. Pp. 579–592.
5. Васильев М. Н., Ворона Н. А., Гавриков А. В. и др. Аномально высокая зарядка дисперсных частиц электронным пучком с энергией электронов 25 кэВ // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36, № 24. С. 54–60.
6. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Шахова И. А. и др. Измерение профиля лазерного луча для изучения воздействия на плазменно-пылевые структуры // *Труды XLVI научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Прикладная физика и энергетика / МФТИ. М., Долгопрудный: 2003. С. 7–8.*
7. Гавриков А. В., Ворона Н. А., Чернышев А. В. и др. Динамические процессы в пылевой жидкости при ламинарном течении, инициируемом лазерным излучением // *Материалы IV Российского Семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды». / МИФИ. М.: 2003. С. 109–110.*
8. Гавриков А. В., Ворона Н. А., Чернышев А. В. и др. Экспериментальное изучение динамики пылевой жидкости при ламинарном течении // *Труды XLVI научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Прикладная физика и энергетика / МФТИ. М., Долгопрудный: 2003. С. 9.*
9. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Васильев М. Н., Петров О. Ф. Экспериментальное изучение воздействия электронного пучка на макрочастицы в упорядоченных структурах в газоразрядной пылевой плазме // *Труды XLVII научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Физика и энергетика / МФТИ. М., Долгопрудный: Типография НИЧ МФТИ, 2004. С. 92–93.*

10. Gavrikov A. V., Shakhova I. A., Ivanov A. S. et al. Experimental study of dusty plasma viscosity // *Dusty Plasmas in Application. International Conference on the Physics Dusty and Combustion Plasmas. Contributions.* Odessa, Ukraine: LLC «Invac», 2004. Pp. 147–150.
11. Гавриков А. В., Шахова И. А., Ворона Н. А. и др. Экспериментальное изучение вязкостных свойств плазменно-пылевой жидкости // *Труды XLVII научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Физика и энергетика / МФТИ.* М., Долгопрудный: Типография НИЧ МФТИ, 2004. С. 94.
12. Gavrikov A. V., Shakhova I. A., Ivanov A. S. et al. Measurement of shear viscosity of dusty plasma // *Dusty Plasmas in Application. International Conference on the Physics Dusty and Combustion Plasmas. Contributions.* Odessa, Ukraine: LLC «Invac», 2004. Pp. 99–102.
13. Gavrikov A., Ivanov A., Shakhova I. et al. [Analysis of Applicability of Navier-Stokes Equation for Dusty Plasma Liquid Viscosity Investigation](#) // *New Vistas in Dusty Plasmas: Fourth International Conference on the Physics of Dusty Plasmas / Ed. by L. Boufendi, M. Mikikian, P. K. Shukla. Vol. 799.* AIP, 2005. Pp. 418–421.
14. Ivanov A., Gavrikov A., Shakhova I. et al. [Viscoplastic Dusty Plasma Flow](#) // *New Vistas in Dusty Plasmas: Fourth International Conference on the Physics of Dusty Plasmas / Ed. by L. Boufendi, M. Mikikian, P. K. Shukla. Vol. 799.* AIP, 2005. Pp. 415–417.
15. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Васильев М. Н. и др. Экспериментальное изучение влияния электронного пучка на плазменно-пылевые структуры // *Физика Экстремальных Состояний Вещества — 2005.* Черноголовка: 2005. С. 197.
16. Гавриков А. В., Шахова И. А., Ворона Н. А. и др. Экспериментальное изучение вязкостных свойств плазменно-пылевой жидкости // *Физика Экстремальных Состояний Вещества — 2005.* Черноголовка: 2005. С. 195–196.
17. Gavrikov A. V., Ivanov A. S., Shakhova I. A. et al. Viscosity Properties of Dusty Plasma Liquid // *Europhysics Conference Abstracts. 32nd EPS Conference on Plasma Physics combined with the 8th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets. Contributed Papers. Vol. 29C.* Tarragona, Italy: 2005. P. P2.136.

18. Vaulina O. S., Gavrikov A. V., Shakhova I. A. et al. Study of Relation between Transport Coefficients in Dusty Plasma Systems // Europhysics Conference Abstracts. 32nd EPS Conference on Plasma Physics combined with the 8th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets. Contributed Papers. Vol. 29 C. Tarragona, Italy: 2005. P. P2.136.
19. Gavrikov A. V., Shakhova I. A., Ivanov A. S. et al. Shear viscosity of gas discharge dusty plasma // 15th Symposium on Applications of Plasma Processes. 3d EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing. Book of Contributed Papers. Podbanske, Slovakia: 2005. Pp. 99–100.
20. Ваулина О. С., Ворона Н. А., Гавриков А. В. и др. Соотношения между транспортными коэффициентами в жидкостных пылевых структурах // Научные труды Института теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН. Сборник / Под ред. В. Е. Форотов, А. П. Лихачев. Т. выпуск 7 — 2004. ОИВТ РАН, 2006. С. 269–272.
21. Васильев М. Н., Ваулина О. С., Ворона Н. А. и др. Экспериментальное изучение процессов в пылевой плазме при воздействии электронного пучка // Труды XLIX научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Физика и энергетика / МФТИ. М., Долгопрудный: 2006. С. 93.
22. Fortov V. E., Gavrikov A. V., Khrustalev Y. V. et al. Experimental Investigation of Processes in Dusty Plasma Structures under Electron Beam Action // Europhysics Conference Abstracts. 33rd EPS Conference on Plasma Physics. Contributed Papers. Vol. 30I. Rome, Italy: 2006. P. P4.030.
23. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Петров О. Ф. и др. Экспериментальное изучение сверхвысокой зарядки пылевых частиц при электронно-пучковом воздействии // Труды 50-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Проблемы современной физики / МФТИ. М., Долгопрудный: 2007. С. 86–87.
24. Васильев М. Н., Ваулина О. С., Ворона Н. А. и др. Экспериментальное исследование процессов, вызываемых воздействием электронного пучка на плазменно-пылевые структуры // Физика Экстремальных Состояний Вещества — 2007. Черноголовка: 2007. С. 197–199.
25. Gavrikov A. V., Fortov V. E., Petrov O. F. et al. [Experimental Studying of Dust Particles Charging by Electron Beam](#) // Multifacets of Dusty Plasmas: Fifth International Conference on the Physics of Dusty Plasmas / Ed.

by J. T. Mendonça, D. P. Resendes, P. K. Shukla. Vol. 1041. AIP, 2008. Pp. 337–338.

26. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Петров О. Ф., Васильев М. Н. Исследование динамики макрочастиц при воздействии электронного пучка // Труды 51-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Проблемы современной физики / МФТИ. М., Долгопрудный: 2008. С. 11–13.
27. Ворона Н. А., Гавриков А. В., Петров О. Ф., Васильев М. Н. Экспериментальное исследование зарядки частиц при непосредственном электронно-пучковом воздействии // Труды 51-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Проблемы современной физики / МФТИ. М., Долгопрудный: 2008. С. 245–247.
28. Васильев М. Н., Ворона Н. А., Гавриков А. В. и др. Экспериментальное исследование зарядки пылевых частиц электронным пучком // Физика Экстремальных Состояний Вещества — 2008. Черноголовка: 2008. С. 269–270.
29. Gavrikov A. V., Fortov V. E., Petrov O. F. et al. Experimental Studying of Dust Particles Charging by Electron Beam // Europhysics Conference Abstracts. 35rd EPS Conference on Plasma Physics & 10th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets. Contributed Papers. Vol. 32D. Hersonissos, Crete, Greece: 2008. P. P1.187.
30. Vorona N. A., Gavrikov A. V., Petrov O. F., Vasiliev M. N. Ultrahigh charging of particles and coulomb explosion in dusty plasma induced by electron beam // Physics of Extreme States of Matter — 2009. Chernogolovka: 2009. Pp. 218–220.
31. Гавриков А. В., Петров О. Ф., Ворона Н. А., Васильев М. Н. Сверхвысокая зарядка частиц и кулоновский взрыв в пылевой плазме, индуцированной электронным пучком // Физическое образование в вузах. Приложение «Труды конференции — конкурса молодых физиков». / Под ред. Н. Калачев, М. Шапочкин. Т. 15. М.: Издательский Дом Московского Физического общества, 2009. С. П12.
32. Сидоров В. С., Гавриков А. В., Петров О. Ф. и др. Исследование спектра излучения плазменно-пылевых образований при электронно-пучковом воздействии // Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII.

Проблемы современной физики / МФТИ. М., Долгопрудный: 2009. С. 152–154.

33. Vasiliev M. N., Vorona N., Gavrikov A. et al. The investigation of heating and charging of dust particles under the electron beam action // *Dusty Plasmas in Application. 3rd International Conference on the Physics Dusty and Combustion Plasmas. Proceedings.* 2010. Pp. 137–138.

## Цитированная литература

1. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А. и др. Пылевая плазма // *УФН.* 2004. Т. 174, № 5. С. 495–544.
2. Goertz C. K. Dusty plasmas in the solar system // *Rev. Geophys.* 1989. Vol. 27, no. 2. Pp. 271–292.
3. Robinson J., P. A., Coakley P. Spacecraft charging-progress in the study of dielectrics and plasmas // *Electrical Insulation, IEEE Transactions on.* 1992. Vol. 27, no. 5. Pp. 944–960.
4. Verheest F. Dusty plasmas in application to astrophysics // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 1999. Vol. 41, no. 3A. P. A445.
5. Winter J. Dust in fusion devices - experimental evidence, possible sources and consequences // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 1998. Vol. 40, no. 6. P. 1201.
6. Цытович В. Н., Винтер Д. Пыль в установках управляемого термоядерного синтеза // *УФН.* 1998. Т. 168, № 8. С. 899–907.
7. *Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space*, Ed. by V. E. Fortov, G. E. Morfill. USA: CRC Press, 2010. P. 440. ISBN: 978-1420083118.
8. Ваулина О. С., Фортов В. Е., Петров О. Ф. и др. Пылевая плазма: эксперимент и теория. М.: Физматлит, 2009. С. 316. ISBN: 9785-94052-179-2.
9. Kroesen G. M. W., Stoffels E., Stoffels W. W. et al. Advanced technologies based on wave and beam generated plasmas // Ed. by H. Schlüter, A. Shivarova. NATO Science Series. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 175. ISBN: 0-7923-5642-X.
10. Langmuir I., Fong C. G., Dittmer A. F. A new type of electric discharge: the streamer discharge // *Science.* 1924. Vol. 60, no. 1557. Pp. 392–394.

11. Ikezi H. Coulomb solid of small particles in plasmas // *Phys. Fluids*. 1986. Vol. 29, no. 6. Pp. 1764–1766.
12. Щуров А. Н., Николаев В. И., Колотыркин В. М. и др. Заряд дисперсных полимерных частиц в тлеющем разряде // *Журн. физ. химии*. 1979. Т. 53, № 4. С. 930–934.
13. Thomas H., Morfill G. E., Demmel V. et al. Plasma Crystal: Coulomb Crystallization in a Dusty Plasma // *Phys. Rev. Lett.* 1994. Vol. 73, no. 5. Pp. 652–655.
14. Фортов В. Е., Нефедов А. П., Торчинский В. М. и др. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда // *Письма в ЖЭТФ*. 1996. Т. 64, № 2. С. 86–91.
15. Fortov V. E., Nefedov A. P., Petrov O. F. et al. Experimental observation of Coulomb ordered structure in sprays of thermal dusty plasmas // *JETP Letters*. 1996. Vol. 63, no. 3. Pp. 187–192.
16. Fortov V. E., Nefedov A. P., Vladimirov V. I. et al. Dust particles in a nuclear-induced plasma // *Phys. Lett. A*. 1999. Vol. 258, no. 4–6. Pp. 305–311.
17. Vaulina O. S., Khrapak S. A. Scaling law for the fluid-solid phase transition in Yukawa systems (dusty plasmas) // *JETP*. 2000. Vol. 117, no. 2. Pp. 326–328.
18. Лифшиц Е., Питаевский Л. П. *Физическая кинетика*. М.: Наука, 1979. Т. X из Теоретическая физика. С. 528.
19. Бычков В. Л., Васильев М. Н., Коротеев А. С. *Электронно-пучковая плазма. Генерация, свойства, применение*. М.: МГОУ А/О «Росвузнаука», 1993. С. 144. ISBN: 5-7045-0219-9.
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика*. М.: Физматлит, 2003. С. 736. ISBN: 5-9221-0121-8, 5-9221-0053-X.
21. Корнилов С. Ю. *Формирование и фокусировка интенсивных электронных пучков в электронно-оптической системе с плазменным эмиттером: Дис. ... канд. техн. наук / ТУСУР. Томск, 2010. С. 142.*

Ворона Назар Александрович

**Зарядка макрочастиц и явления переноса  
в плазменно-пылевых структурах при пучковых воздействиях**

Автореферат

---

Подписано к печати	17.11.2010	Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд. л. 1,45	Усл.-печ. л. 1,35
Тираж 100 экз.	Заказ № 127	Бесплатно

---

ОИВТ РАН, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2