

*На правах рукописи*

СВЕТЛОВ Антон Сергеевич

**КОЛЛОИДНЫЕ СИСТЕМЫ АКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В  
ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

1.3.9 - физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории диагностики пылевой плазмы ФГБУН Объединенного института высоких температур Российской академии наук, <b>ПЕТРОВ Олег Федорович</b>
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор кафедры Общей Физики I Физического факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), <b>КАРАСЕВ Виктор Юрьевич</b>
	доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова РАН (ИПФ РАН), <b>ГОЛУБЕВ Сергей Владимирович</b>
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН, г. Новосибирск).

Защита состоится «   » \_\_\_\_\_ 2023 г. в \_\_\_\_ ч. \_\_\_\_ мин. на заседании 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 адресу 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2., конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур: [jih.t.ru/science/dissert-council/](http://jih.t.ru/science/dissert-council/).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Объединенный институт высоких температур Российской академии наук**, 2023

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному изучению активного броуновского движения в коллоидных системах в тлеющем разряде постоянного тока.

### **Актуальность работы**

Активными броуновскими частицами принято считать частицы, которые могут преобразовывать энергию окружающей среды в энергию собственного кинетического движения. Примером активных броуновских частиц являются бактерии, подвижные клетки, пылевые частицы в разрядной плазме и сверхтекучем гелии и т.д. Активные броуновские частицы могут двигаться как независимо, так и проявлять коллективный характер движения. Средняя кинетическая энергия активных броуновских частиц может значительно превосходить среднюю кинетическую энергию (температуру) окружающей среды, что свидетельствует о значительной неравновесности таких систем.

Изначально прикладная значимость физики активных броуновских частиц заключалась в развитии методов повышения эффективности катализа. Со временем область приложений значительно расширилась и к настоящему времени включает: исследования в области доставки лекарственных веществ; разработку новых материалов и др. Фундаментальный аспект исследований заключается в развитии физики неравновесных систем; физики диссипативных структур; принципов самоорганизации, самосборки и др.

В работе изучаются активные коллоидные частицы в плазме тлеющего разряда постоянного тока. В отличие от пассивных броуновских частиц, которые находятся в тепловом равновесии с окружающей средой, активные броуновские частицы способны поглощать энергию из окружающей среды и преобразовывать её в кинетическую энергию, выводящую частицы из состояния термодинамического равновесия, в следствии системы, содержащие активные броуновские частицы, являются открытыми. В рамках данной работы впервые экспериментально изучена динамика уединенных частиц и малых кластеров при воздействии лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

## **Цель диссертационной работы**

Целью экспериментального исследования являлось изучение и анализ активного броуновского движения, а также динамических свойств активных броуновских частиц в коллоидной плазме тлеющего разряда постоянного тока.

## **Поставлены и решены следующие задачи:**

- 1) Изучено активное броуновское движение одиночных коллоидных частиц с поглощающей поверхностью и в отсутствие поглощения в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения.
- 2) Изучено активное броуновское движение в кластерах из активных броуновских частиц при воздействии лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока.
- 3) Изучена динамика одиночных частиц при воздействии лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока.
- 4) Изучена динамика коллоидных частиц в кластерах, образованных активными броуновскими частицами при воздействии лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока.
- 5) Изучен механизм возникновения активного броуновского движения частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения.

## **Научная новизна работы**

Впервые экспериментально изучено активное броуновское движение одиночных частиц с поглощающей поверхностью и в отсутствие поглощения, левитирующих в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения.

Изучена динамика одиночных частиц с поглощающей и не поглощающей поверхностью при воздействии лазерного излучения различной мощности находящихся в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

Впервые экспериментально изучено активное броуновское движение частиц в кластерах при воздействии лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

Изучена динамика активных броуновских частиц в кластерах, находящихся в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения различной мощности.

Изучен механизм возникновения активного броуновского движения частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения.

### **Научная и практическая значимость работы**

Результаты исследований, представленных в данной работе, затрагивают сразу несколько областей науки, такие как: физика диссипативных структур, физика низкотемпературной, в том числе пылевой плазмы, физика неравновесных систем. Представленные в данной работе результаты экспериментальных исследований могут оказаться полезными широкому кругу специалистов, в том числе занимающихся созданием новых конструктивных и функциональных материалов, изучением свойств активных коллоидных систем и разработкой приложений, связанных с их использованием.

Со временем область применения данных знаний значительно расширяется, к настоящему времени уже включает: исследования в области медицины (прицельной доставки лекарств или микроустройств к больным органам), в технических целях (разрушения вредных веществ в окружающей среде), в научных целях (исследования самоорганизации и эволюции в коллоидных и плазменно-пылевых системах).

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

- 1) Результаты экспериментального изучения активного броуновского движения одиночных частиц при воздействии лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока.
- 2) Результаты экспериментального изучения динамики одиночных частиц с поглощающей поверхностью и в отсутствие поглощения, левитирующих в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения различной плотности мощности.
- 3) Результаты экспериментального изучения активного броуновского движения частиц в кластерах при воздействии лазерного излучения в

плазме тлеющего разряда постоянного тока.

- 4) Результаты экспериментального изучения динамики активных броуновских частиц в кластерах, находящихся в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения различной плотности мощности.
- 5) Механизм активного броуновского движения частиц при воздействии лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность (высокая степень точности измерений и объективности оценок) результатов исследования обеспечена: использованием современных методик получения и анализа исходных экспериментальных данных; высокой точностью повторяемости в экспериментах на различных установках и согласии с результатами численных исследований и теоретическими предсказаниями других авторов; положения и выводы, сформулированные в диссертации, были апробированы на 12 международных и российских научных конференциях и семинарах: 19th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation (CSCPIER-2023), III Международная Конференция «Газоразрядная Плазма и Синтез Наноструктур», Казань, Россия, 2022; XII Всероссийская конференция по физической электронике, Махачкала, Республика Дагестан, Россия, 2022; X International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (PPPT-10): September 12-16, 2022, Minsk, Belarus; 18th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation (CSCPIER-2022), Moscow, Russia, April 11-13, 2022; XXXVII Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2022), Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 1–6 March 2022; XXXVI International Conference Of Intense Energy Fluxes With Matter, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 1–6 March 2021 ; XXXV International Conference on Equations of State for Matter, March 1–6, 2020, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia; 64-я научная Всероссийская конференция МФТИ (г. Долгопрудный, 2021); 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 23 - 29 ноября 2020.

Обоснованность выводов и рекомендаций достигается: применением многократно апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата; сравнением полученных в работе результатов с результатами зарубежных и отечественных авторов; обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях; публикацией результатов диссертационного исследования в рецензируемых изданиях, входящих в перечень международной базы Web of Science (WoS) и рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертационных исследований, а также в трудах докладов известных научных конференций.

### **Публикации**

В основу диссертации легло 3 статьи опубликованных в ведущих зарубежных и российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК (список в конце автореферата).

### **Личный вклад автора работы**

Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в подготовке и проведении экспериментальных работ, обработке и анализе результатов. Автор активно участвовал в совместных обсуждениях и подготовке рукописей к публикации.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 110 страниц, включая 34 рисунка и список цитируемой литературы, содержащий 107 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** дается общая характеристика диссертации: обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов; сформулированы цели работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации результатов, основных публикациях, структуре и объеме работы.

В **первой главе** представлена общая информация об активном броуновском движении частиц необходимая для понимания содержания диссертационной работы.

В **разделе 1.1** рассматривается явление броуновского движения частиц, которое представляет собой хаотическое перемещение частиц микронных и субмикронных размеров в жидкости или газе. А также понятия физики диссипативных структур, которые изучают спонтанное формирование сложных структур в открытых системах и связаны с концепциями упорядоченности и хаоса.

В **разделе 1.2** представлен обзор основных терминов, используемых в контексте активного броуновского движения частиц. Терминология в этой области является важной основой для понимания и коммуникации в научных исследованиях. Важно отличать активное броуновское движение от классического броуновского движения. В классическом броуновском движении частицы движутся пассивно под влиянием столкновений с молекулами (атомами) окружающей среды. В активном броуновском движении, напротив, частицы обладают собственной активностью и могут преодолевать случайные тепловые флуктуации, осуществляя направленное движение. Одним из ключевых терминов, связанных с активным броуновским движением является термин активные броуновские частицы. Активные броуновские частицы представляют собой микро- или наноразмерные объекты, которые обладают способностью к самодвижению при воздействии внутренних или внешних сил. Также представлены примеры активных броуновских частиц.

**Раздел 1.3** освещает систематизацию активных броуновских частиц, представляя классификации в соответствии с механизмом движения, типом активации и источником энергии. Дополнительно, рассмотрен тип активных частиц, известных как "социальные", которые взаимодействуют друг с другом, образуя совместное поведение. Этот вид классификации активных броуновских частиц играет ключевую роль в понимании их характеристик, поведения и возможных применений. Она позволяет систематизировать их многообразие, выявить основные свойства и способствует разработке новых материалов и технологий на их основе.



В разделе 1.4 описаны основные механизмы активного броуновского движения частиц, такие как биологические, физические, влияние форетических сил, магнитных и электрических полей на динамику структур и отдельных микрочастиц, воздействие излучением, помимо этого исследования в области моделирования таких систем и теоретические подходы.

Существует ещё одна разновидность броуновского движения – горячее броуновское движение (англ. «Hot» *Brownian Motion*). Основными причинами горячего броуновского движения являются тепловая энергия и столкновения частиц. Вещество состоит из атомов или молекул, которые находятся в постоянном тепловом движении. Каждая частица обладает кинетической энергией, которая заставляет ее двигаться и взаимодействовать со своими соседними частицами. В результате этих столкновений частицы случайным образом изменяют направление и скорость своего движения. Горячее броуновское движение является макроскопическим проявлением микроскопического хаоса, который происходит на уровне атомов и молекул. Из-за огромного числа взаимодействующих частиц, горячее броуновское движение может выглядеть совершенно случайным и непредсказуемым. Однако, несмотря на этот хаос, существуют статистические законы и модели, которые позволяют нам описывать и предсказывать поведение системы.

**Раздел 1.5** посвящен прикладным аспектам исследования активного броуновского движения в коллоидной плазме. Коллоидная плазма - это пример термодинамически открытой, диссипативной системы, которая широко встречается в окружающем мире, включая космос и технологические процессы. Она содержит левитирующие заряженные микрочастицы и может формировать пылевые структуры из различных частиц, различающихся по форме, составу и свойствам. Частицы в плазме могут быть пассивными или активными броуновскими, способными преобразовывать доступную энергию в кинетическое движение.

Описаны плазменные разряды, а также рассмотрено образование пылевой фракции в плазме разрядов постоянного тока.

Представлены исследования, которые показывают, что размеры и формы

частиц оказывают значительное влияние на их активное броуновское движение, которое происходит в результате термофореза, электрофореза, воздействия радиометрической силы. Описаны прикладные применения в области материаловедения, в транспортировке и перемешивании материалов на микромасштабах, в биологических науках.

Рассмотрено несколько преимуществ и особенностей использования тлеющего разряда постоянного тока для исследования активного броуновского движения. Все важнейшие результаты данной работы получены в экспериментах, проведенных в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

**В главе 2** представлен и описан специально модернизированный экспериментальный стенд и комплекс трехмерной диагностики для исследований коллоидной плазмы в тлеющем разряде постоянного тока. Экспериментальная установка представляет возможность проводить детальные эксперименты и изучать различные параметры коллоидной плазмы. Её модернизация произведена на базе известных и проверенных технологий. Низкотемпературная плазма формировалась с использованием технологий тлеющего разряда постоянного тока.

**Раздел 2.1** посвящен описанию модернизированного экспериментального стенда для изучения коллоидной плазмы тлеющего разряда постоянного тока, который состоит из двух частей: вакуумной системы и электрической части. Детально разъяснены все компоненты: вакуумная система (см. рисунок 2.1), которая состоит из стеклянной трубки (камеры), вакуумного поста, системы газонапуска и контроля давления. Электрическая часть состоит из катода, анода и двух источников питания, один из которых добавляет ток смещения, посредством которого контролируются параметры разряда. Описан способ инжекции микрочастиц, которые образуют пылевую компоненту в плазме тлеющего разряда.

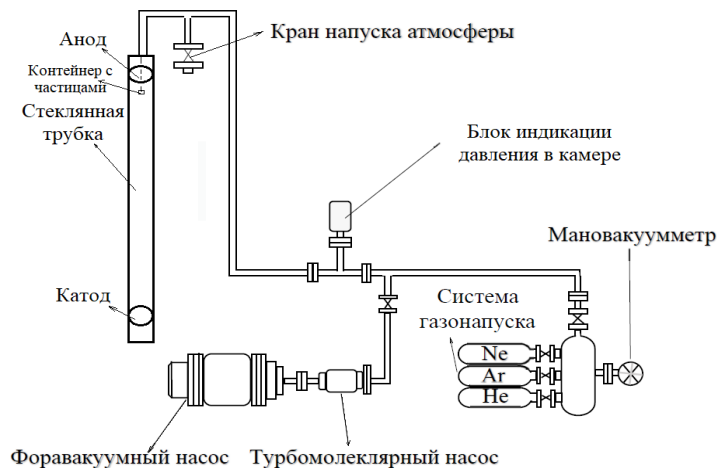


Рисунок 2.1 Схема вакуумной системы экспериментального стенда тлеющего разряда постоянного тока.

В разделе 2.2 представлено сопоставление анализа среднеквадратичного смещения микрочастиц при использовании двухмерного и трехмерного методов диагностики их пространственного положения. Комплексы для трехмерной и двухмерной диагностики в коллоидной плазме состоят из газоразрядного аргонового или твердотельного лазера (в зависимости от особенностей эксперимента), устройства увеличения диаметра пучка, одной (двухмерный случай) или двух (трехмерный случай) камер высокоскоростной съемки (см. рисунок 2.2) и персонального компьютера для записи и последующей обработки полученных данных.

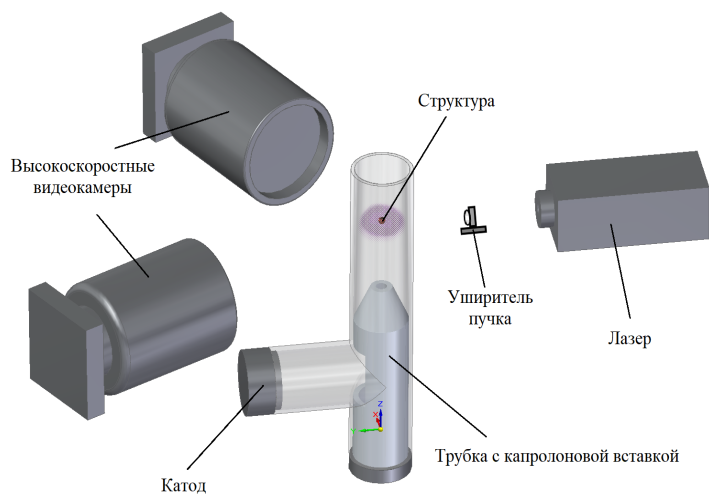


Рисунок 2.2 Схема диагностического комплекса экспериментального стенда тлеющего разряда постоянного тока.

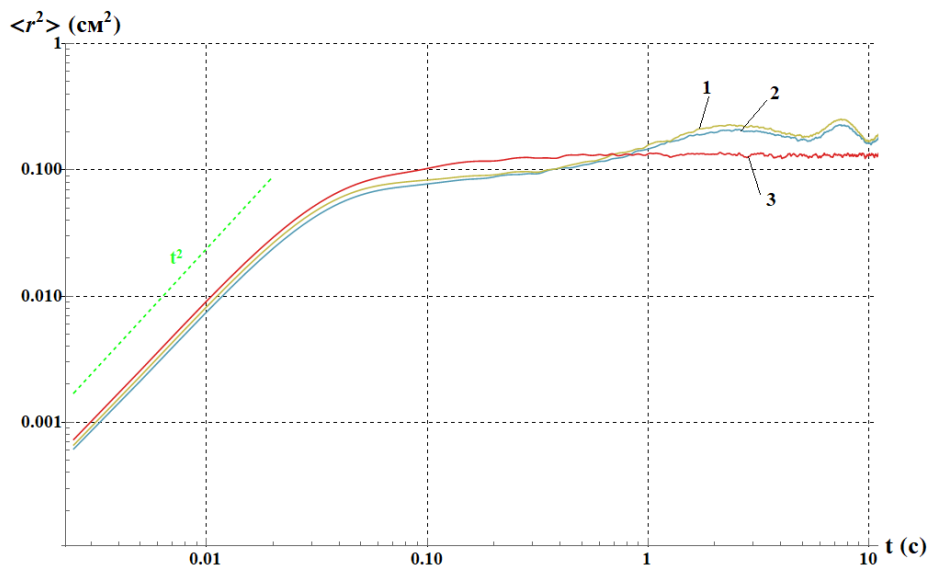


Рисунок 2.3 Среднеквадратичное смещение одиночной янус-частицы под воздействием лазера плотностью мощности  $1.15 \text{ Вт/см}^2$ : кривая 1 (желтая) - для первой камеры; кривая 2 (синяя) - для второй камеры; кривая 3 (красная) - трехмерный случай.

В результате анализа выявлено, что для качественной оценки среднеквадратичных смещений можно использовать методики анализа, как для двухмерного случая, когда для визуализации и анализа используется видеосъемка движения частиц одной видеокамерой, а изображение траектории движения частицы получается в проекции на плоскость матрицы этой видеокамеры. Количественная разница при этом в отличие от трехмерной диагностики движения отличается в зависимости от исследуемого временного промежутка, в нашем случае до  $t \sim 0.1$  секунды погрешность составляет не более 5%. При больших временах отличие достигает 10% [3]. Представлены результаты дополнительных исследований распределений проекций сечений пучка при различной мощности для твердотельного лазера.

**Раздел 2.3** содержит выводы к Главе 2.

**Глава 3** посвящена экспериментальным результатам по активному броуновскому движению уединенных частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока, а также изучению динамики таких частиц.

**В разделе 3.1** представлена основная информация об исследованиях активного броуновского движения одиночных микрочастиц в трехмерной

конфигурации тлеющего разряда постоянного тока. Целью которых являлось изучение активного броуновского движения, а также сравнение динамики частиц с поглощающей и не поглощающей поверхностями свойствами, находящихся в одинаковой плазменной среде.

**Раздел 3.2** посвящен описанию объекта исследования. В частности, в экспериментах использовались следующие виды сферических пылевых частиц меламин-формальдегида (МФ) диаметром  $D \approx 5$  мкм: пылевые частицы без поглощающего покрытия; частицы в медной оболочке; частицы с частичным медным покрытием (янус-частицы). Фотоизображения пылевых частиц, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) представлены на рисунке 3.1. А также разъяснена методика изготовления янус-частиц в плазме высокочастотного газового разряда.

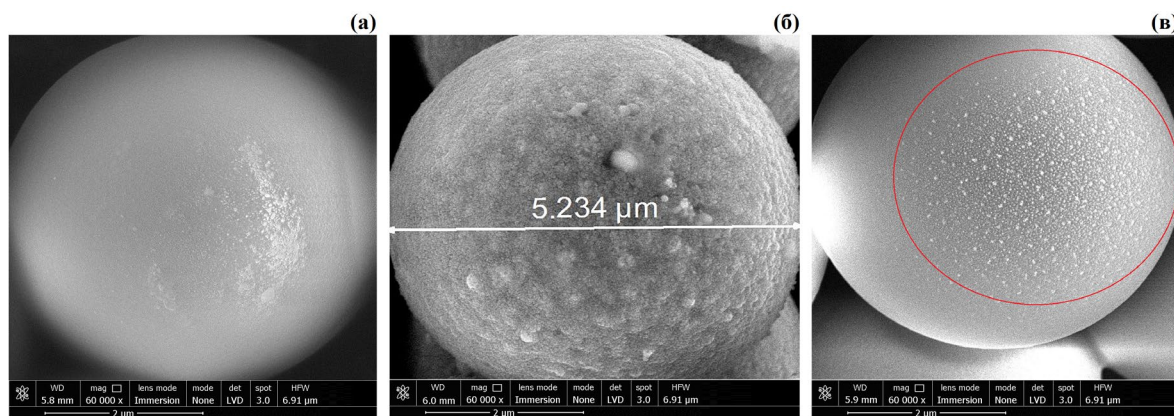


Рисунок 3.1 СЭМ изображения сферических монодисперсных частиц меламино-формальдегида (МФ) диаметром 5 мкм: (а) без поглощающего покрытия; (б) в медной оболочке; (в) янус-частица.

**В разделе 3.3** приведен анализ экспериментальных данных, описан баланс сил, воздействующих на коллоидную частицу в тлеющем разряде постоянного тока. Помимо этого, для анализа трехмерного динамического процесса в нашем эксперименте использовались две синхронизированные видеокамеры, фиксирующие движение частиц в двух перпендикулярных плоскостях, что позволило определить координаты в трехмерном пространстве в любой момент времени, для каждого типа частиц. Результаты обработки полученных видеоданных показаны на рисунках 3.2 и 3.3.

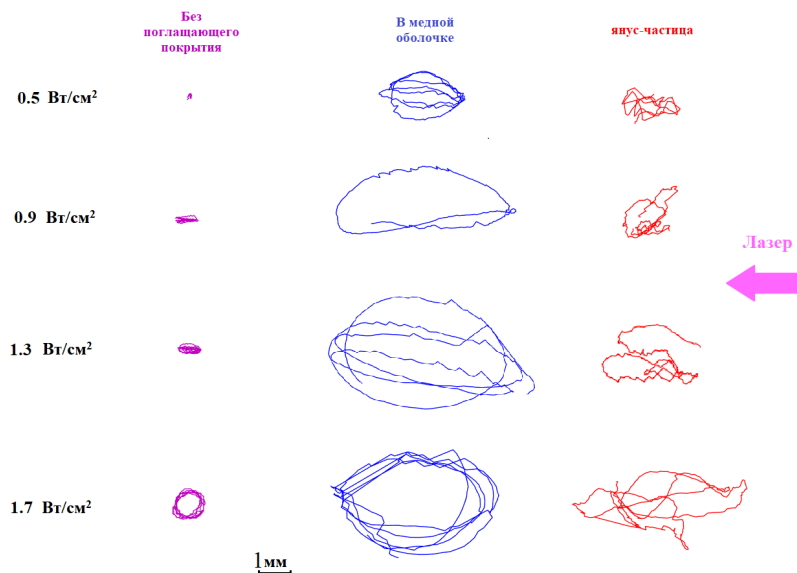


Рисунок 3.2 Вид сверху (горизонтальная составляющая активного броуновского движения). Траектории пылевых частиц в слое разряда постоянного тока за время  $\Delta t=1$  с при различных плотностях мощности лазера. Левый ряд — МФ частица без поглощающего покрытия; центральный ряд — МФ частица в медной оболочке; правый ряд — янус-частица.

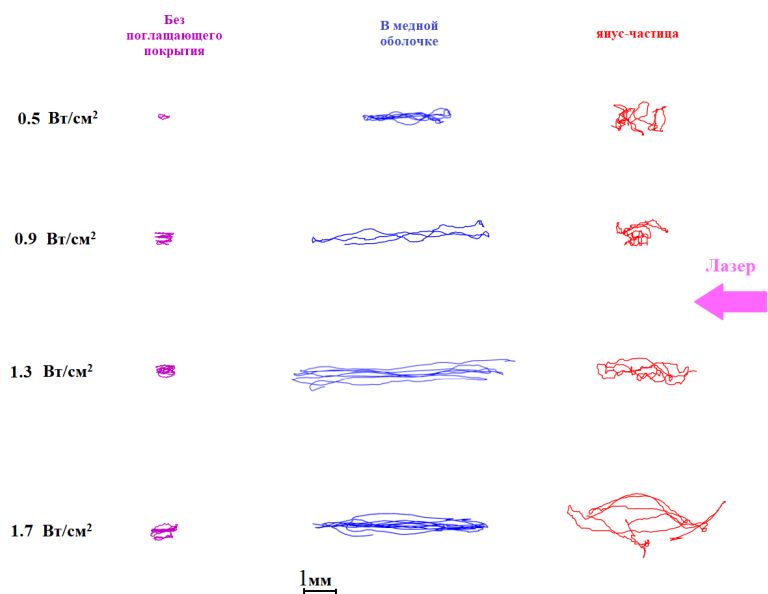


Рисунок 3.3 То же, что и на рис. 3.2, но вид слева (вертикальная составляющая активного движения).

Как видно, увеличение амплитуды активного движения при увеличении интенсивности лазерного излучения является общей чертой, характерной для всех частиц. Однако, характер движения частиц имеет существенные отличия.

Частицы без поглощающего покрытия совершают движения самой малой амплитуды. Их траектории вытянуты вдоль направления лазерного луча. С увеличением величины  $P_L$ , траектории частиц без поглощающего покрытия становятся почти круговыми в горизонтальной плоскости. Движение в вертикальном направлении является случайным, его амплитуда слабо зависит от мощности лазера.

МФ частицы в медной оболочке значительно эффективнее поглощают лазерное излучение по сравнению с частицами без поглощающего покрытия [1]. Это, в свою очередь, приводит к заметному увеличению амплитуды активного движения в горизонтальной плоскости. Горизонтальные траектории имеют форму близкую к эллипсоидальной, вытянутой вдоль направления лазерного луча (рисунок 3.2). Так же, как и в предыдущем случае, вертикальная составляющая движения МФ частиц в медной оболочке относительно невелика и практически не зависит от мощности лазера (рисунок 3.3).

Движение янус-частиц является наиболее сложным. Форма их траектории сильно зависит от мощности лазерного излучения. Регулярных (эллиптических и круговых) треков практически не наблюдалось, хотя некоторые участки траекторий имели форму дуг при больших мощностях лазера. Часто наблюдался излом, соединяющий соседние дугами. Тем не менее, амплитуда движения росла с ростом мощности лазера, причем как горизонтальная, так и вертикальная.

Для изучения динамики и активного броуновского движения одиночных частиц с помощью автоматизированной системы обработки видеоизображений были рассчитаны такие параметры движения как временные зависимости среднеквадратичного смещения, а также средние кинетические энергии. В случае одной частицы производится усреднение по времени, графики представлены на рисунке 3.4.

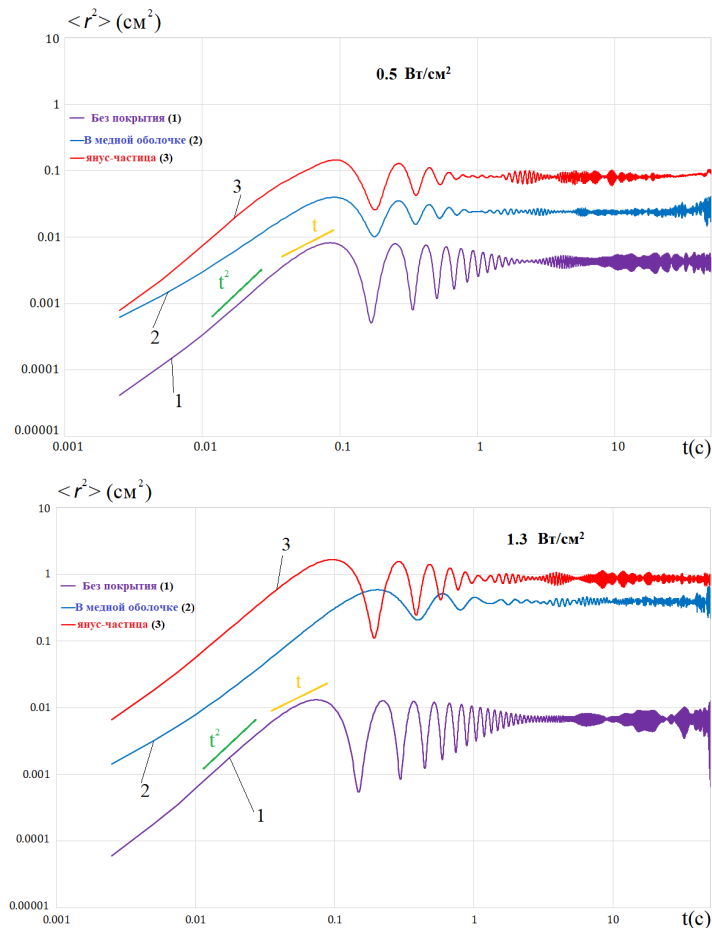


Рисунок 3.4 Среднеквадратичные смещения одиночных частиц от времени кривая 1 - для частицы без поглощающего покрытия; кривая 2 - для МФ частицы в медной оболочке; кривая 3 - для янус-частицы.

На малых временах графики демонстрируют баллистический режим движения с асимптотикой  $\sim t^2$  (зеленая линия) для всех типов частиц. Начиная с момента времени  $t \sim 0.1$  с наблюдается режим движения «в ловушке» с определенным периодом.

На рисунке 3.5 приведена зависимость средней кинетической энергии движения одиночных частиц  $T_k$  от мощности лазера. Время наблюдения составляло 60 секунд. Кинетическая энергия частиц росла по мере увеличения плотности мощности лазерного излучения в диапазоне от 0.5 до 1.7 Вт/см<sup>2</sup> следующим образом: от  $T_k \approx 1$  эВ до  $T_k \approx 14$  эВ – для МФ частиц без поглощающего покрытия; от  $T_k \approx 3$  эВ до  $T_k \approx 270$  эВ – для МФ частиц в медной оболочке; от  $T_k \approx 14$  эВ до  $T_k \approx 340$  эВ – для янус-частиц.

Кинетическая энергия частиц без поглощающего покрытия мала во всем диапазоне плотностей мощности лазерного излучения, так как они слабо



поглощают. Для МФ частиц в медной оболочке и янус-частиц наблюдается значительное увеличение кинетической энергии с ростом интенсивности лазерного излучения, что можно объяснить увеличением радиометрической силы за счет особенностей поверхности частиц.

На рисунках 3.2 и 3.3 в этом же диапазоне мощностей наблюдается резкий рост амплитуды активного движения (что проявляется в увеличении протяженности треков частиц). Абсолютные значения кинетической энергии янус-частиц всегда больше чем для МФ частиц в медной оболочке.

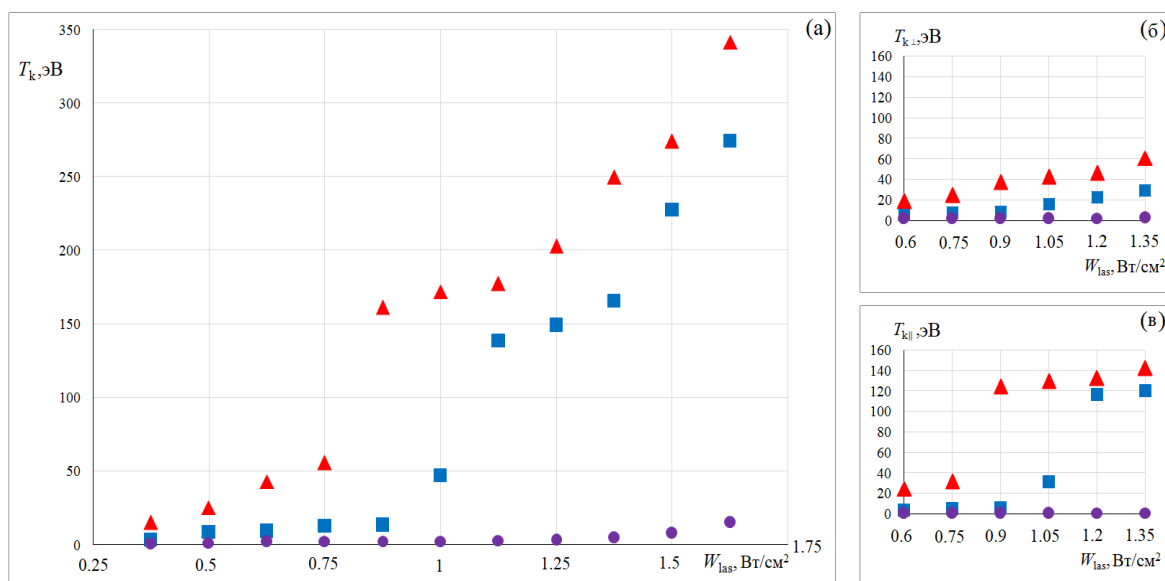


Рисунок 3.5(а) Зависимость средней кинетической энергии одиночных пылевых частиц от мощности лазера; б) то же, но для продольной (аксиальной) составляющей; в) то же, но для поперечной (радиальной) составляющей. Частица без поглощающего покрытия (кружки); МФ частица в медной оболочке (квадраты); янус-частица (треугольники).

Как видно, кинетическая энергия пылевых частиц без поглощающего покрытия мала во всем диапазоне мощностей лазера, так как они слабо поглощают лазерное излучение (см. рис. 3.5(а)). Для МФ частицы в медной оболочке, как и для янус-частиц, значительное увеличение кинетической энергии можно объяснить увеличением радиометрической силы за счет эффективного поглощения излучения поверхностью пылевой частицы.

### Раздел 3.4 содержит выводы по Главе 3.

**Четвертая глава** посвящена исследованию частиц в кластерах, находящихся в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения различной плотности мощности.

**В разделе 4.1** представлена основная информация об экспериментальных исследованиях формирования и динамики цепочечных структур активными броуновскими частицами в тлеющем разряде постоянного тока. Механизм активного движения частиц связан с преобразованием лазерного излучения частицами в энергию собственного (не теплового) движения.

**Раздел 4.2** посвящен постановке эксперимента, его условиям, параметрам и балансу сил, воздействующих на пылевые частицы, формирующие квазиодномерные (цепочечные) структуры, содержащие 11 микрочастиц под действием лазерного излучения. Сильное взаимодействие заряженных частиц приводило к более сложному поведению наблюдаемых структур. В эксперименте использовались следующие типы монодисперсных сферических меламин-формальдегидных (МФ) частиц диаметром  $D \approx 5$  мкм: частицы в медной оболочке; частицы с частичным медным покрытием (янус-частицы), подробное описание свойств и параметров данных типов частиц было приведено в главе 3 в разделе 3.2.

**В разделе 4.3** проведен анализ экспериментальных данных для квазиодномерных (цепочечных) структур в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения. В процессе эксперимента микрочастицы заданных типов инжектировались в объем разрядной плазмы тока, где в результате баланса рассмотренных сил наблюдалось формирование цепочечных структур (рисунок 4.1).

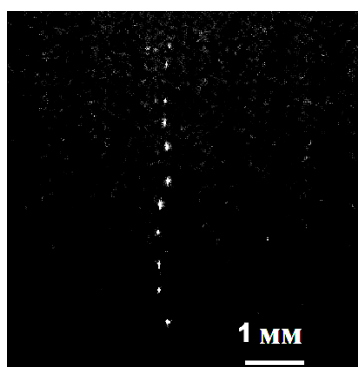


Рисунок 4.1 Фотография квазиодномерной цепочечной структуры.

Воздействие на цепочечные структуры производилось лазерным излучением различной интенсивности. Для анализа динамики частиц, данные видеосъемки обрабатывались специализированным ПО, которое позволяло определить координаты частиц  $x, z$ , среднеквадратичные смещения  $\langle r^2(t) \rangle$  и другие параметры. Траектории движения частиц представлены на рисунке 4.2 и 4.3.

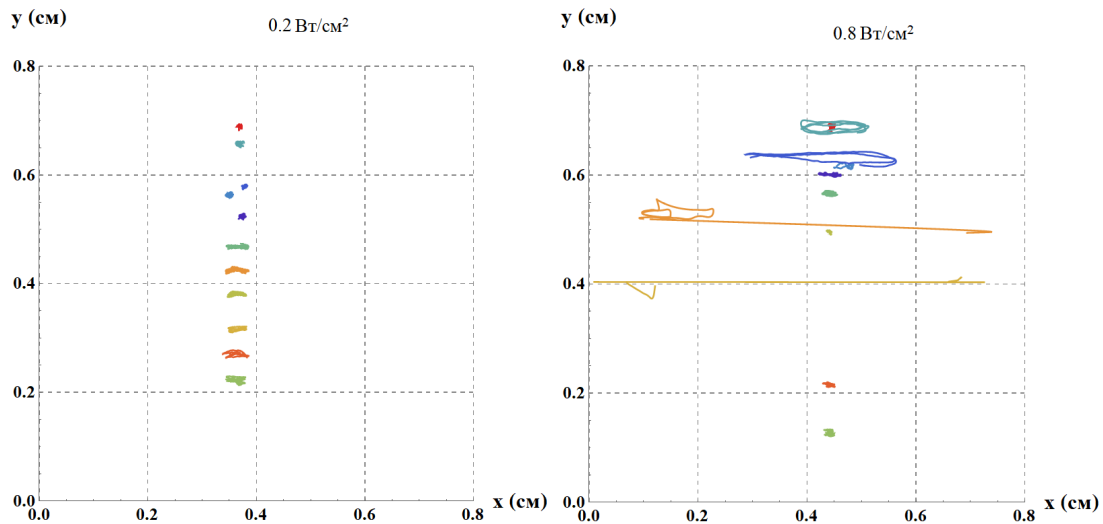


Рисунок 4.2 Траектории МФ частиц в медной оболочке в цепочечной структуре за промежуток времени  $\Delta t=0.5$  с, при различной интенсивности лазерного излучения.

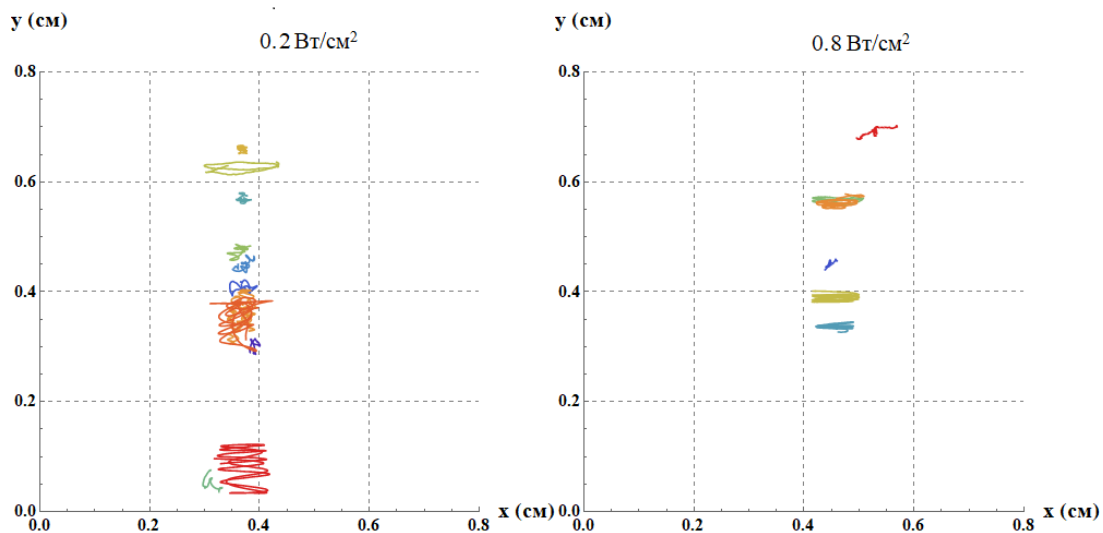


Рисунок 4.3 Траектории янус-частиц в цепочечной структуре за промежуток времени  $\Delta t=0.5$  с, при различной интенсивности лазерного излучения.

Как видно, при минимальной плотности мощности лазера, частицы обоих типов формируют продольную цепочечную структуру. Это состояние

соответствует минимальной кинетической энергии частиц. Потенциальной энергии межчастичного взаимодействия, которая обусловлена кулоновскими силами и наличием ионного фокуса, достаточно для формирования упорядоченной цепочки. Однако, динамика частиц начинает меняться при увеличении интенсивности лазерного излучения. Действительно, МФ частицы в медной оболочке сохраняют цепочечную структуру несмотря на рост их кинетической энергии (см. рисунок 4.2). При этом вертикальное межчастичное расстояние немного уменьшается с увеличением мощности лазера. По-видимому, ионный фокус в рассматриваемом случае является пространственно размытым, что может быть фактором устойчивости цепочки. Структура из янус-частиц под воздействием лазерного излучения деградирует значительно быстрее, хотя и сохраняет некоторые признаки вертикальной цепочки. Вероятно, это связано с тем, что кинетическая энергия янус-частиц растет быстрее с ростом интенсивности излучения по сравнению с МФ частицами в медной оболочке [1]. Это их свойство можно назвать эффективной теплоемкостью, которая у янус-частиц минимальная в данной ситуации. Следовательно, при одних и тех же значениях интенсивности лазерного излучения кинетический разогрев цепочки из янус-частиц развивается быстрее, что приводит к деградации структуры.

Важной характеристикой движения частиц является среднеквадратичное смещение, определяемое таким же образом, как и описано в главе 3 для одиночных микрочастиц. Графики для МФ частиц в медной оболочке (рисунок 4.4.) и янус-частиц (рисунок 4.5) представлены ниже.

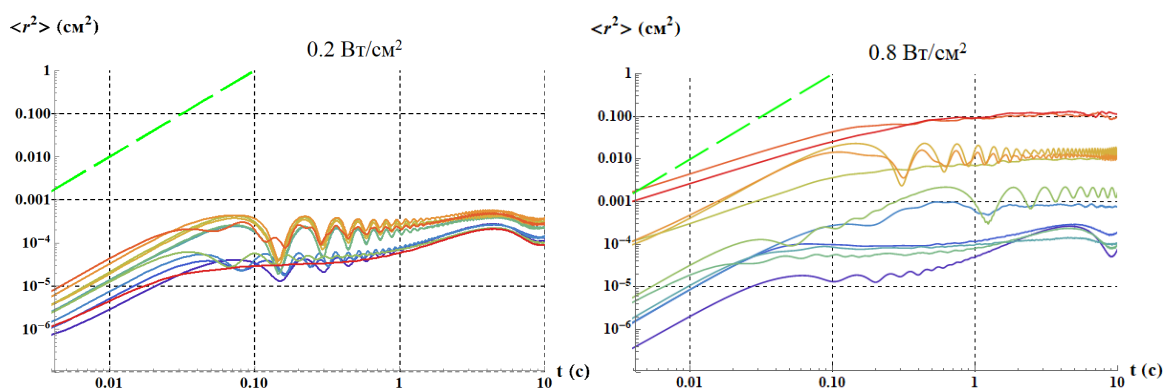


Рисунок 4.4 Среднеквадратичные смещения от времени при различной интенсивности лазерного излучения для МФ частиц в медной оболочке.

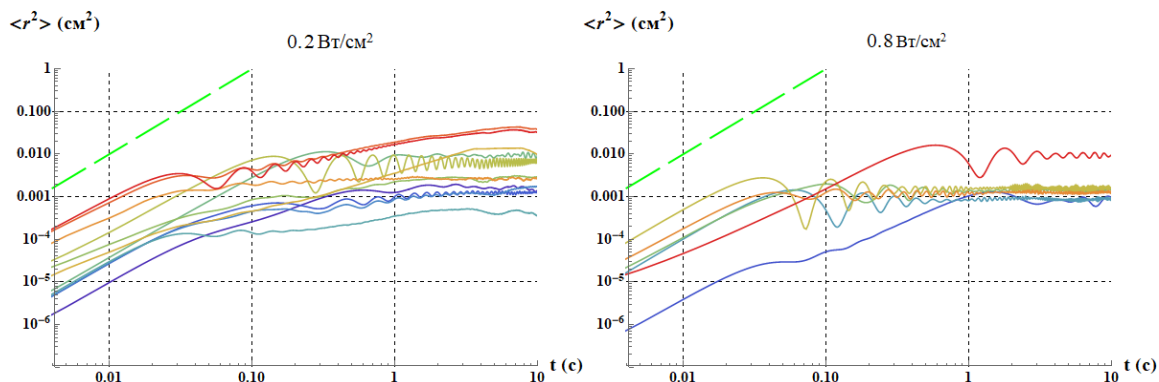


Рисунок 4.5 Среднеквадратичные смещения от времени при различной интенсивности лазерного излучения для янус-частиц.

На малом временном масштабе графики демонстрируют баллистический режим движения с асимптотикой  $\sim t^2$  (штриховая зеленая линия) для всех частиц. Начиная с момента времени  $t \sim 0.1$  с наблюдается режим движения «в ловушке» с определенным периодом. Из анализа рисунков 4.4 и 4.5 можно оценить степень хаотичности движения частиц в цепочечных структурах. Действительно, при малых интенсивностях лазерного излучения период орбитального вращения всех частиц примерно одинаков. Начальную фазу движения частиц из рисунков 4.4 и 4.5 определить нельзя. Однако можно сказать, что с ростом интенсивности излучения, янус-частицы хаотизируются значительно быстрее и в большей степени [1,2]. Такой характер активности полностью согласуется с результатами, описанными в главе 3 для одиночных частиц.

Для изучения активного броуновского движения исследуем такую характеристику как средняя кинетическая энергия частиц. На рисунке 4.6 представлена зависимость кинетической энергии от плотности мощности, усредненная по времени ( $T_c=60$  с) и по ансамблю частиц.

Из рисунка 4.6 видно, что незначительное увеличение интенсивности лазерного излучения приводит к увеличению кинетической энергии частиц на порядок (для МФ частиц в медной оболочке) и более (для янус-частиц). Кинетическая энергия янус-частиц растет значительно быстрее с ростом интенсивности излучения. При этом при плотности мощности  $0,4 \text{ Вт/см}^2$  достигается предельное значение кинетической энергии для двух самых энергичных янус-частиц, которые покидают цепочечную структуру.

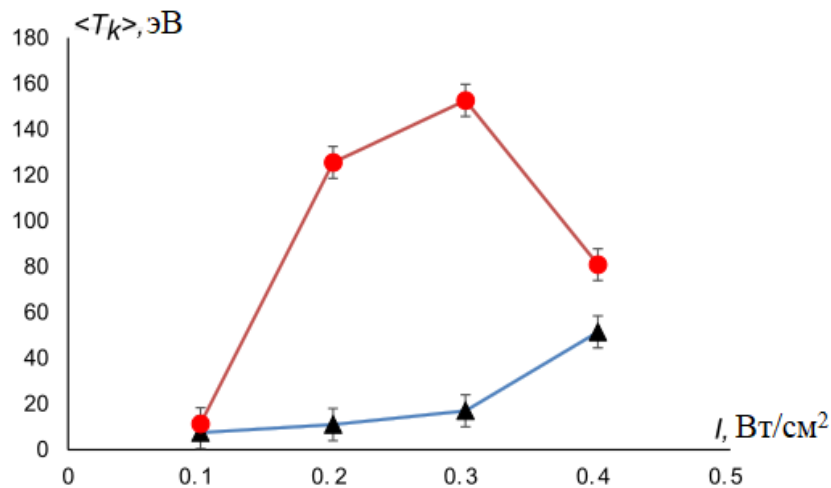


Рисунок 4.6 Зависимость усредненной по времени и по ансамблю кинетической энергии частиц от интенсивности лазерного излучения: треугольники – цепочка из МФ частиц в медной оболочке, кружки – цепочка из янус-частиц.

С этим связано наблюдаемое уменьшение  $\langle T_k \rangle$  при  $I = 0.4$  Вт/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что кинетическая энергия частиц значительно превышает среднюю кинетическую энергию атомов буферного газа ( $T_n \sim 0.03$  эВ), что указывает на активный характер движения.

Исследуемые системы активных броуновских частиц являются открытыми: их динамика обусловлена притоком внешней энергии (лазерное излучение) и преобразованием полученной энергии в кинетическую энергию движения. Поэтому для анализа состояния активных броуновских систем нужны методики, не основывающиеся на термодинамической замкнутости системы. В качестве такого подхода была предложена динамическая энтропия  $S(\varepsilon)$  – мера средней “скорости убегания” частицы от ее начального положения.

Для всех рассмотренных состояний системы из МФ частиц в медной оболочке были получены зависимости динамической энтропии первого пересечения от нормированного параметра огрубления  $\varepsilon^* = \varepsilon/L_p$ , где  $L_p$  – среднее расстояние между частицами структуры. С ростом интенсивности лазерного излучения «пучок» динамической энтропии рассеивается, при этом значения  $\varepsilon^*$  выросло на порядок, что говорит об изменении локализации частиц в цепочечной структуре из МФ частиц в медной оболочке и увеличении области их движения.

Для структуры из янус-частиц, также были получены зависимости. С ростом интенсивности лазерного излучения значения динамической энтропии  $S(\varepsilon^*)$  растут, а сам «пучок» динамической энтропии рассеивается, при этом область существования  $\varepsilon^*$  растет, что говорит о изменении локализации частиц в цепочечной структуре и увеличении области их движения.

Для описания различия между пассивным броуновским движением и активным броуновским движением, следуя, нужно рассмотреть среднюю длину траектории движения частицы по ансамблю, заданную начальным положением и ориентацией движения в момент времени  $t = 0$ .

Для структуры из МФ частиц в медной оболочке установлено, что при увеличении значений  $I_p$  до  $0.34 \text{ Вт/см}^2$  величина линейного смещения  $\langle L \rangle$  вдоль направления движения макрочастиц растет, в то время как величина линейного смещения по нормали к направлению движения макрочастиц остается постоянной и в пределах погрешности близка к 0. Таким образом, можно сделать вывод, что частицы в цепочечной структуре из МФ частиц в медной оболочке являются активными броуновскими частицами и их активность растет с увеличением интенсивности лазерного излучения[2].

Для анализа характера броуновского движения янус-частиц в квазиодномерной структуре также была построена зависимость усредненного для всех частиц линейного смещения  $\langle L \rangle$  вдоль и по нормали к направлению движения частиц, при различных значениях интенсивности лазерного излучения  $I_p$ . Установлено, что при различных значениях  $W_p$  общий характер броуновского движения янус-частиц в цепочечной структуре изменяется, от характерного активным броуновским частицам направленного движения ( $W_p = 0.05, 0.19 \text{ Вт/см}^2$ ) до диффузионного ( $W_p = 0.07, 0.15 \text{ Вт/см}^2$ ) и вращательного по замкнутым траекториям ( $W_p = 0.54 \text{ Вт/см}^2$ ). Можно сделать вывод, что активность янус-частиц зависит от интенсивности воздействующего лазерного излучения и изменяется нелинейно, что, в свою очередь, может говорить о динамических фазовых переходах в квазиодномерной системе и влиянии на них различие в свойствах частиц в силу отличной площадью покрытия металлом.

**Раздел 4.4** содержит выводы по Главе 4.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы, а именно:

1) Показано, что одиночные коллоидные частицы с поглощающей поверхностью под действием лазерного излучения в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока совершают активное броуновское движение, т.е. преобразуют энергию излучения в кинетическую энергию.

Для коллоидных частиц МФ в медной оболочке и янус-частиц увеличение плотности мощности лазера приводило к значительному увеличению их кинетической энергии и к расширению области их движения, в отличие от МФ частиц без поглощающего покрытия. Показано, что янус-частицы имеют более сложный характер движения по сравнению с другими исследуемыми частицами при воздействии лазерного излучения.

2) Экспериментально изучена динамика одиночных частиц с поглощающей поверхностью и без поглощения при воздействии лазерного излучения различной плотности мощности в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока.

На малых временах частицы демонстрируют баллистический режим движения, начиная с момента времени  $t \sim 0.1$  с наблюдается режим движения «в ловушке» с определенным периодом. Для янус-частиц среднее квадратичное смещение является наибольшим за одинаковый промежуток времени по сравнению с МФ частицами в медной оболочке и без поглощающего покрытия.

3) Показано, что коллоидные частицы МФ в медной оболочке и янус-частицы в цепочечных структурах под действием лазерного излучения в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока совершают активное броуновское движение.

Экспериментально показано, что воздействие лазерного излучения на квазиодномерные (цепочечные) структуры влияет по-разному на структуры из частиц МФ в медной оболочке и из янус-частиц. С увеличением интенсивности лазерного излучения увеличивалась средняя кинетическая энергия коллоидных частиц. Однако, для янус-частиц это изменение было немонокотонным.

Структура из частиц МФ в медной оболочке на протяжении всего эксперимента сохраняла свою целостность, частицы не меняли своё положение и



не покидали ловушку. Частицы движутся в основном в радиальном направлении, увеличивая амплитуду вращения.

Янус-частицы изменяли своё положение в структуре относительно друг друга при увеличении интенсивности лазерного излучения, также при возрастании плотности мощности более чем в два раза относительно начальной величины частицы начинали покидать ловушку стратифицированного тлеющего разряда. Структура из янус-частиц показала себя как более активная и неравновесная по сравнению со структурой из частиц МФ в медной оболочке. Это обусловлено анизотропией свойств янус-частиц.

4) Представлены результаты экспериментального изучения формирования и динамики цепочечных структур активными броуновскими частицами в тлеющем разряде постоянного тока.

Как и для одиночных частиц на малых временах все частицы демонстрируют баллистический режим движения, начиная с момента времени  $t \sim 0.1$  с наблюдается режим движения «в ловушке» с определенным периодом.

С увеличением интенсивности лазерного воздействия для обоих типов частиц в цепочечных структурах за одинаковый временной промежуток наблюдалось увеличение среднеквадратичного смещения. Для янус-частиц это изменение было наибольшим по сравнению с частицами МФ в медной оболочке. Увеличение интенсивности лазерного излучения более чем в четыре раза приводит к изменению характера движения МФ частиц в медной оболочке, на графиках среднеквадратичных смещений от времени наблюдается соответствие режиму супердиффузии, асимптотики которого лежат в промежутке от  $t$  до  $t^2$ .

5) Изучен механизм активного броуновского движения частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения. Действие лазерного излучения на частицу может привести к появлению радиометрической силы, связанной с поглощением на поверхности частиц, изучаемые частицы имеют неоднородное покрытие, что в свою очередь приводит к неравномерному распределению температуры по поверхности частицы.

Явление, приводящее к радиометрическому эффекту, имеет молекулярно-кинетическую природу: сталкивающиеся молекулы газа с более нагретой

поверхностью частицы после отскока имеют более высокую кинетическую энергию, чем молекулы, сталкивающиеся с ее менее нагретой областью. Это означает, что молекулы, отражаясь от более нагретой области частицы, придают ей больший импульс, чем молекулы, отраженные от менее нагретой части. Таким образом, возникает спонтанное нарушение симметрии, и частице передается нескомпенсированный импульс, флуктуирующий по величине и направлению. В результате интенсивность поступательного и вращательного движения частицы увеличиваются и, таким образом наблюдается активное броуновское движение.

**Публикации.** Опубликовано 3 статьи в ведущих зарубежных и российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК.

1. Svetlov A.S., Vasiliev, M.M., Kononov, E.A., Petrov, O.F., Trukhachev, F.M. 3D Active Brownian Motion of Single Dust Particles Induced by a Laser in a DC Glow Discharge. *Molecules* 2023, 28, 1790.
2. Светлов А.С., Васильев М.М., Голятина Р.И., Майоров С.А., Петров О.Ф., Активное броуновское движение микрочастиц в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения. *Прикладная физика*, 2023, № 5, с. 53-60.
3. Светлов А.С., Кононов Е.А., Трухачев Ф.М., Васильев М.М., Петров О.Ф., Активное броуновское движение пылевых частиц в квазиодномерных (цепочечных) структурах в тлеющем разряде. *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*, 2023, том 164, вып. 11, с. 715-721.

**СВЕТЛОВ Антон Сергеевич**

## **КОЛЛОИДНЫЕ СИСТЕМЫ АКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Автореферат

---

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч. – изд.л. 1,5	Усл.-печ.л. 1,5
Тираж 100 экз.	Заказ №	Бесплатно

---

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