

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, ПЕТРОВ Олег Федорович
Официальные оппоненты:	
Ведущая организация:	

Защита состоится « » _____ 2023 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д (), 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/.

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 ()

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Активными броуновскими частицами принято считать частицы, которые могут преобразовывать энергию окружающей среды в энергию собственного направленного движения. Движение активных частиц принято называть активным броуновским движением. Примером активных частиц являются многие бактерии, подвижные клетки микро- и нанороботы, активные микрочастицы, пылевые частицы в разрядной плазме и сверхтекучем гелии и т.д. Активные частицы могут двигаться как независимо, так и проявлять коллективный характер. Средняя кинетическая энергия активных частиц может значительно превосходить среднюю кинетическую энергию (температуру) окружающей среды, что свидетельствует о значительной неравновесности процесса.

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; разработка новых материалов и др. Фундаментальный аспект исследований заключается в развитии физики неравновесных систем; физики диссипативных структур; физики хаоса; принципов самоорганизации, самосборки и др.

Коллоидная плазма является удобным объектом исследования активных броуновских частиц. С одной стороны, в плазме, по сравнению с электролитами, значительно меньшую роль играют химические реакции, что позволяет более точно управлять параметрами процесса. С другой стороны, значительно меньшая вязкость плазмы позволяет использовать слабые источники энергии активного движения.

Цель диссертационной работы

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

Поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Сопоставление методик двухмерной и трехмерной диагностики исследования динамики микрочастиц в коллоидной плазме тлеющего разряда постоянного тока.
- 2) Исследование движения одиночных микрочастиц с различным типом поверхности под действием лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока с одинаковыми параметрами.
- 3) Исследование динамики в цепочечных структурах из активных броуновских частиц с различным типом поверхности под действием лазерного излучения различной интенсивности в плазме тлеющего разряда постоянного тока с одинаковыми параметрами.

Научная новизна работы

Проведено сопоставление методик двухмерной и трехмерной диагностики для исследования плазменно-пылевых структур и частиц, левитирующих в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

Впервые экспериментально исследовано активное броуновское движение частиц с различным типом поверхности, левитирующих в плазме тлеющего разряда постоянного тока. В частности, произведено сравнение динамики микрочастиц с различным типом поверхности находящихся в плазменной среде с одинаковыми параметрами при воздействии лазерного излучения различной мощности.

Впервые экспериментально исследовано активное броуновское движение в цепочечных структурах из активных броуновских частиц под действием лазерного излучения различной интенсивности в тлеющем разряде постоянного тока. Исследовано два типа таких структур в зависимости от типа микрочастиц.

Научная и практическая значимость работы

Результаты исследований, представленных в данной работе, затрагивают сразу несколько областей науки, такие как: физика диссипативных структур, физика пылевой и низкотемпературной плазмы, физика неравновесных систем, физика хаоса, принципы самоорганизации, самосборки, зарождения жизни.

Представленные в данной работе результаты экспериментальных исследований могут оказаться полезными широкому кругу специалистов, в том числе занимающихся созданием новых конструкционных 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), технических целях (разрушения вредных веществ в окружающей среде), в научных целях (исследования самоорганизации в коллоидных и плазменно-пылевых системах).

Научные положения, выносимые на защиту:

- 1) Произведено сопоставление методик двухмерной и трехмерной диагностики исследования динамики микрочастиц в коллоидной плазме тлеющего разряда постоянного тока.
- 2) Результаты экспериментального изучения активного броуновского движения одиночных микрочастиц с различным типом поверхности в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения.
- 3) Результаты экспериментального исследования формирования цепочечных структур из активных броуновских микрочастиц и их динамика в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения различной интенсивности. Анализ влияния свойств поверхности микрочастиц на характер их движения при неизменных параметрах газового разряда.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Представленные в данной диссертационной работе результаты экспериментальных исследований с высокой точностью воспроизводятся в многочисленных экспериментах. Работа обобщает результаты, представленные в научных публикациях автора.

Результаты исследований докладывались на 12 международных и

всероссийских научных конференциях с международным участием: 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;

Исследования в рамках диссертационной работы поддержаны грантом РФФИ № 19-12-00354.

Публикации

За время работы опубликовано 5 статей в ведущих зарубежных и российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, первые 3 из них посвящены данной работе (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. Также 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 108 страниц, включая 34 рисунка и список цитируемой литературы, содержащий 105 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 в том числе в пылевой плазме, необходимая для понимания содержания диссертационной работы.

В **разделе 1.1** рассматривается явление броуновского движения частиц, которое представляет собой хаотическое перемещение мельчайших частиц 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. В контексте активного броуновского движения важно отличать его от классического броуновского движения. В классическом броуновском движении частицы движутся пассивно под влиянием столкновений с молекулами окружающей среды. В активном броуновском движении, напротив, частицы обладают собственной активностью и могут преодолевать случайные тепловые флуктуации, осуществляя управляемое движение. Помимо этого, один из ключевых терминов, связанных с активным броуновским движением, - это "активные частицы". Активные частицы представляют собой микроскопические или наномасштабные 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. 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 механическое 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 и электрофореза. Описаны прикладные применения в области материаловедения, в транспортировке и перемешивании материалов на микромасштабе, 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 для трехмерной диагностики для исследований коллоидной плазмы в тлеющем разряде постоянного тока. Которые в совокупности предоставляют возможность проводить детальные эксперименты и изучать различные аспекты пылевой плазмы, такие как ее динамика, структура, взаимодействие между пылевыми частицами и другие физические явления. Его 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,

которые 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 и системы газонапуска и контроля давления, также электрическая часть которая состоит из катода, анода и двух источников питания, один из которых добавляет ток смещения и разряд зажигается у катода, а не на блок напуска. Описан способ инъекции микрочастиц, которые образуют пылевую компоненту в плазме тлеющего разряда.

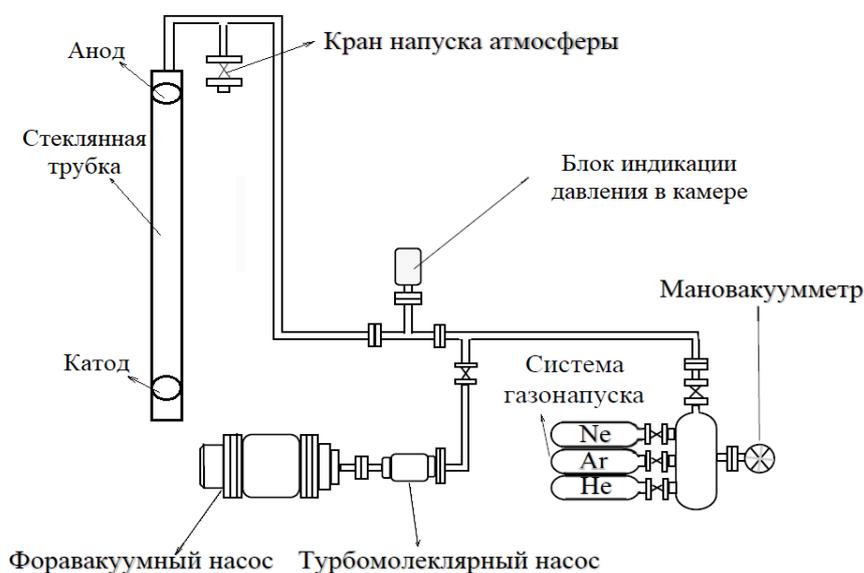


Рисунок 2.1 Схема вакуумной системы экспериментального стенда тлеющего разряда постоянного тока.

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 приложения эксперимента), устройства увеличения диаметра пучка, системы из одной (двухмерный случай) или двух (трехмерный случай) камер высокоскоростной съемки (см. рисунок 2.2) и персонального компьютера для видеозаписи проходящих процессов и последующей обработки полученных данных при помощи пакета специально разработанных программ.

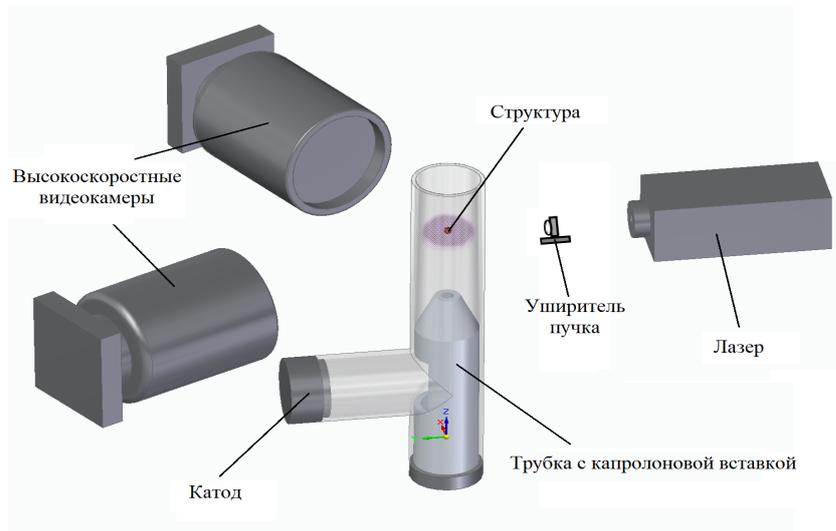


Рисунок 2.2 Схема диагностического комплекса экспериментального стенда тлеющего разряда постоянного тока.

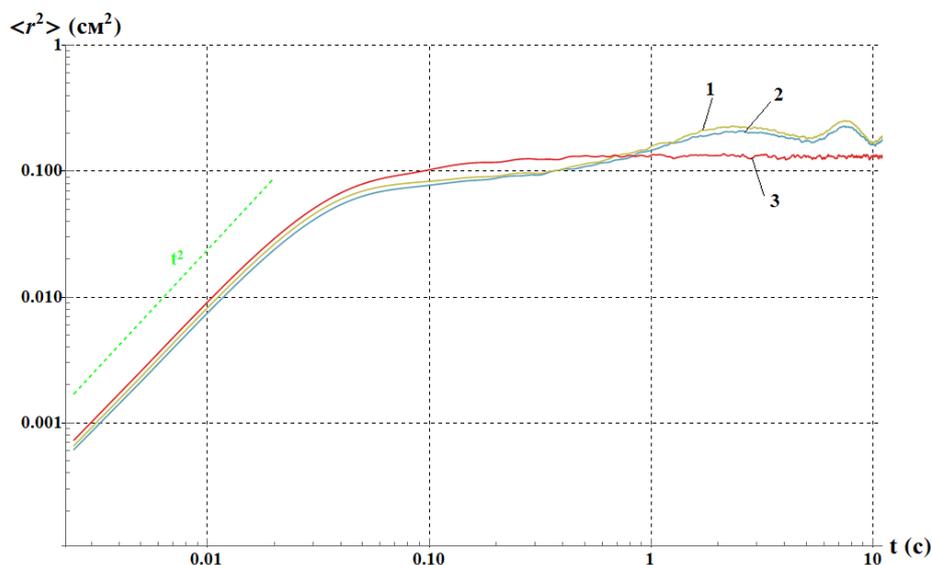


Рисунок 2.3 Среднеквадратичное смещение одиночной янус частицы под воздействием лазера мощностью 900 мВт (плотностью мощности 1.15 Вт/см²): кривая 1 (желтая) - для первой камеры; кривая 2 (синяя) - для второй камеры; кривая 3 (красная) - трехмерный случай.

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%. 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 микрочастиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

В разделе 3.1 представлена основная информация об исследованиях активного броуновского движения одиночных микрочастиц в трехмерной конфигурации тлеющего разряда постоянного тока. Целью которых являлось сравнение динамики частиц с разными поверхностными 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 покрытия; частицы с равномерным тонким медным покрытием; 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.

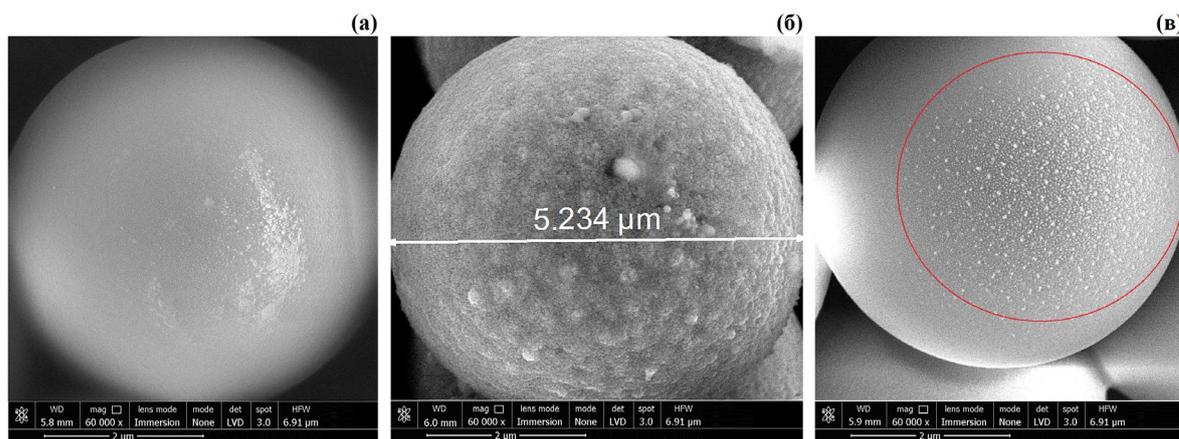


Рисунок 3.1 СЭМ изображения сферических монодисперсных частиц меламина-формальдегида (МФ) диаметром 5 мкм: (а) без покрытия; (б) с однородным медным покрытием; (в) с частичным медным покрытием – янус частицы.

В разделе 3.3 приведен анализ экспериментальных данных, описан баланс сил, воздействующих на пылевую 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.

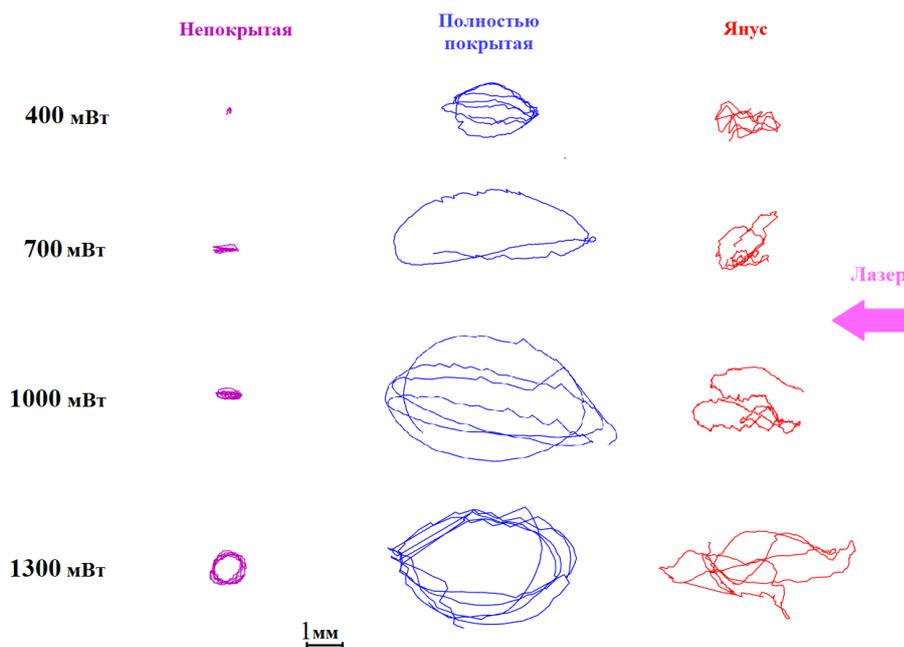


Рисунок 3.2 Вид сверху (горизонтальная составляющая активного броуновского движения). Траектории пылевых частиц в слое разряда постоянного тока за время $\Delta t=1$ с при различных мощностях лазера W_{las} : 400, 700, 1000 и 1300 мВт. Левый ряд — непокрытая частица; центральный ряд — частица с медным покрытием; правый ряд — янус частица.

Как видно, увеличение амплитуды активного движения при увеличении интенсивности лазерного излучения является общей чертой, характерной для всех

типов частиц. Однако, характер движения разных типов частиц имеет существенные отличия.

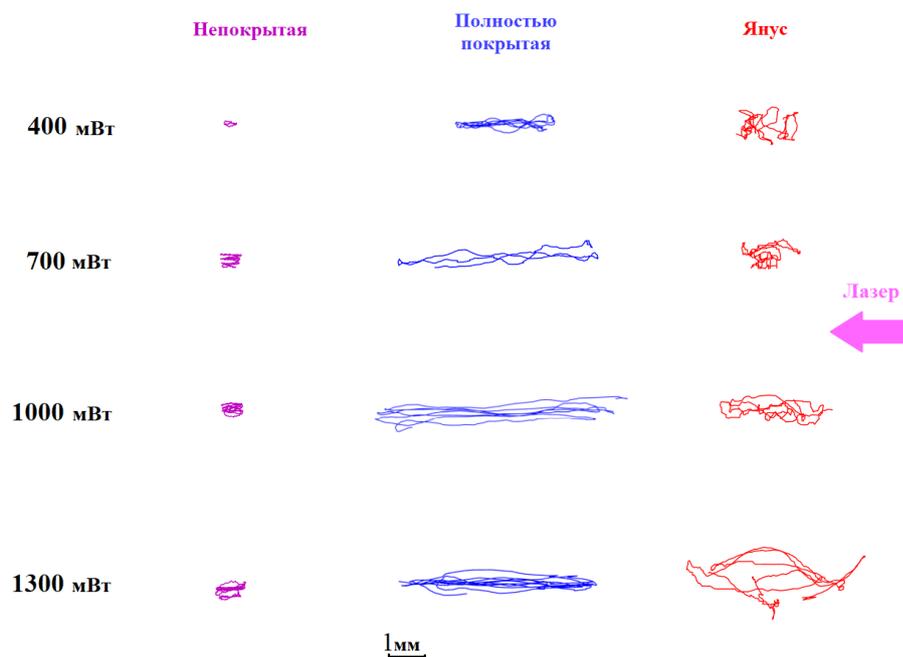


Рисунок 3.3 То же, что и на рис. 3.2, но вид сбоку (вертикальная составляющая активного движения).

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

Частицы с медным покрытием значительно эффективнее поглощают лазерное излучение по сравнению с непокрытыми частицами [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 покрытых медью частиц 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.

С помощью автоматизированной системы обработки видеоизображений были рассчитаны такие параметры движения как временные зависимости среднеквадратичного смещения частиц, а также их средние кинетические энергии. В случае одной частицы производится усреднение по времени, графики представлены на рисунке 3.4.

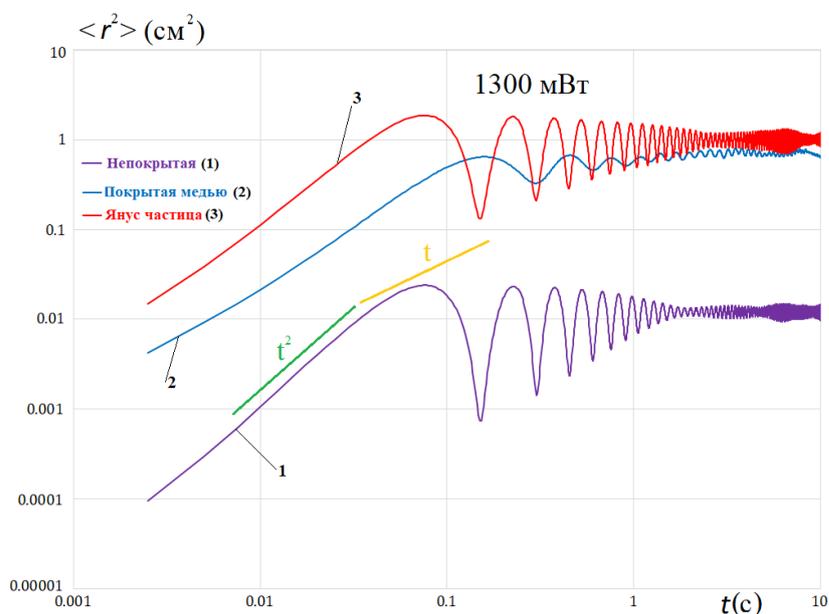


Рисунок 3.4 Среднеквадратичные смещения одиночных частиц под воздействием лазера мощностью 1300 мВт: кривая 1 - для непокрытой частицы; кривая 2 для частицы с медным покрытием; кривая 3 для янус частицы.

На коротком временном масштабе 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 частиц от мощности лазера. Время наблюдения

составляло 60 секунд. Кинетическая энергия частиц росла по мере увеличения мощности лазера в диапазоне от 300 до 1300 мВт следующим образом: $T_{kin} \approx 1$ эВ до $T_{kin} \approx 14$ эВ – для непокрытых МФ частиц; от $T_{kin} \approx 3$ эВ до $T_{kin} \approx 270$ эВ – для частиц, покрытых медью; от $T_{kin} \approx 14$ эВ до $T_{kin} \approx 340$ эВ – для янус частиц.

Кинетическая энергия непокрытых частиц мала во всем диапазоне мощностей лазерного излучения, так как они слабо поглощают свет. Для частиц с медным покрытием и янус частиц наблюдается значительное увеличение кинетической энергии с ростом интенсивности лазерного излучения, что можно объяснить эффективностью фотофореза за счет особенностей поверхности частиц. Также можно наблюдать, что для покрытых частиц и янус частиц наблюдается скачок на графике $T_k(W_{las})$ при $W_{las} \approx 700-900$ мВт, что может быть связано особенностью электростатической ловушки.

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 у покрытых медью частиц.

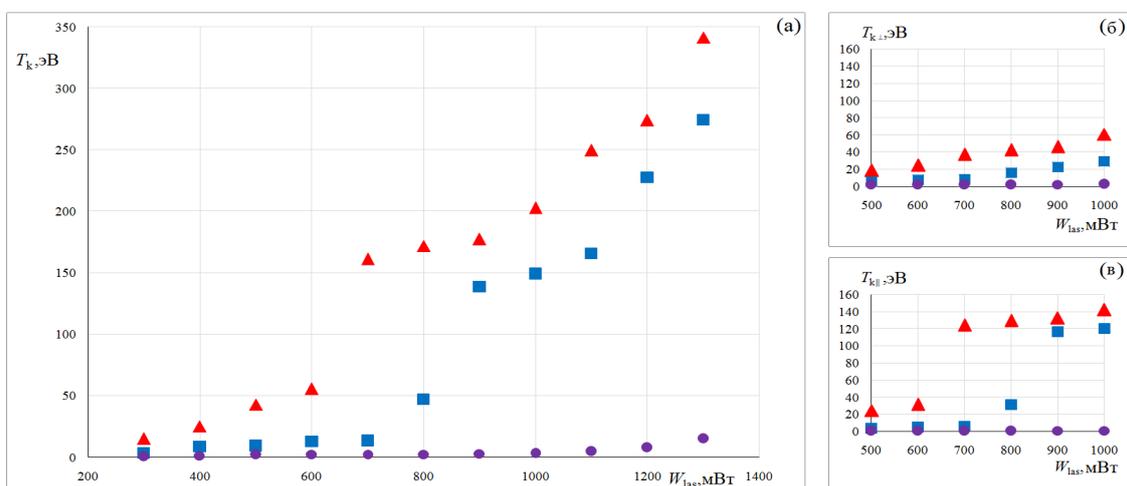


Рисунок 3.5 (а) Зависимость средней кинетической энергии одиночных пылевых частиц от мощности лазера W_{las} ; б) то же, но для продольной (аксиальной) составляющей активного броуновского движения; в) то же, но для поперечной (радиальной) составляющей активного броуновского движения. Частица без покрытия (кружки); Частица с медным покрытием (квадраты); янус частица (треугольники).

Как видно, кинетическая энергия пылевых частиц без покрытия мала во всем диапазоне мощностей лазера, так как они слабо поглощают лазерное излучение (см. рис. 3.5(a)). Для пылевой частицы с покрытием, как и для янус частиц, значительное увеличение кинетической энергии можно объяснить увеличением силы фотофореза за счет эффективного поглощения света поверхностью пылевой частицы.

Раздел 3.4 содержит выводы по Главе 3.

Четвертая глава посвящена исследованию структур активных броуновских частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения различной интенсивности.

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 с однородным тонким медным покрытием; 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).

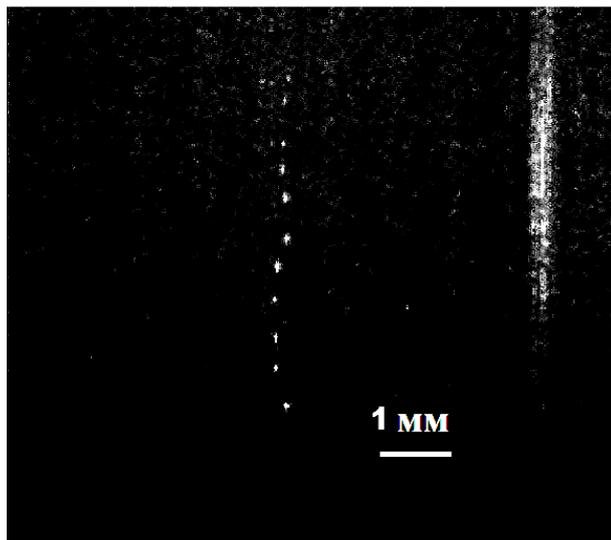


Рисунок 4.1 Фотография квазиодномерной цепочечной структуры.

Для возбуждения активного броуновского движения, цепочечные структуры облучались 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.

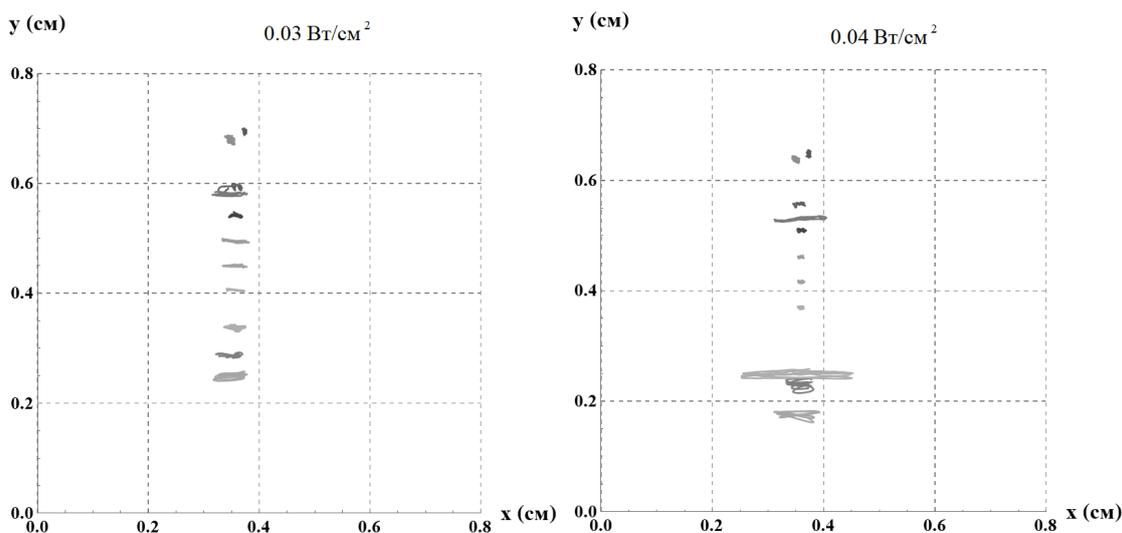


Рисунок 4.2 Траектории частиц с покрытием в цепочечной структуре в страте тлеющего разряда за промежуток времени $\Delta t=0.5$ с, при различной

интенсивности лазерного излучения.

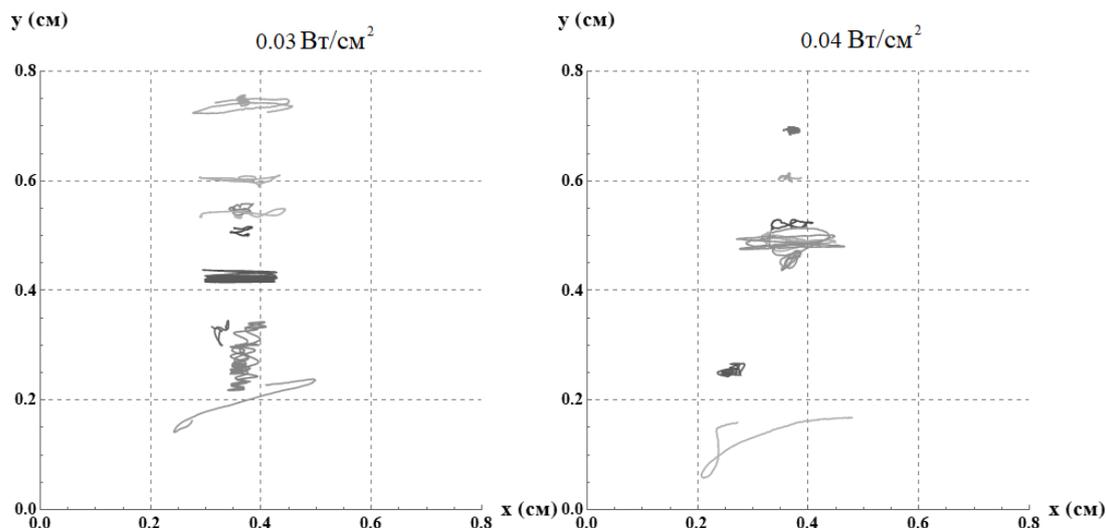


Рисунок 4.3 Траектории янус частиц в цепочечной структуре в страте тлеющего разряда за промежуток времени $\Delta t=0.5$ с, при различной интенсивности лазерного излучения.

Как видно, при минимальной 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, покрытые частицы 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 частицами с однородным покрытием [1] как показано в главе 3. 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 ее деградации.

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

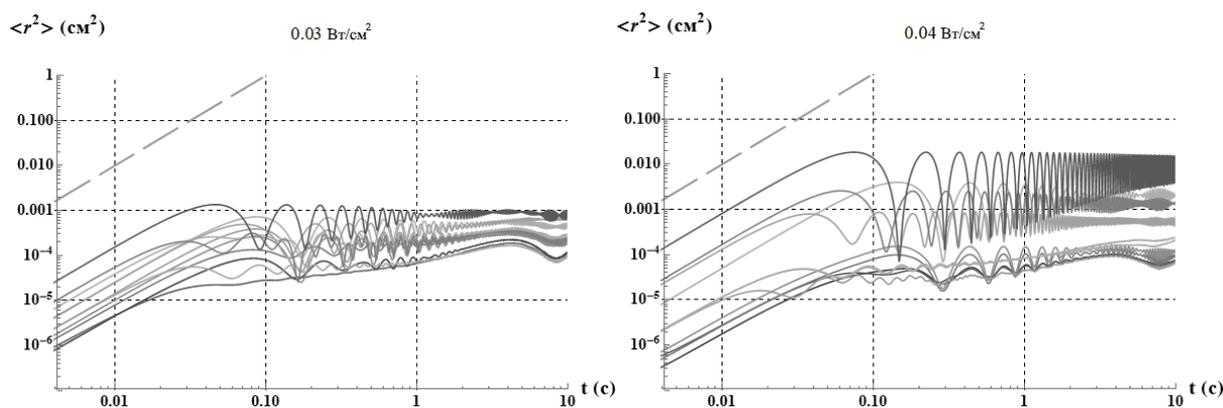


Рисунок 4.4 Среднеквадратичные смещения от времени при различной интенсивности лазерного излучения для полностью покрытых частиц.

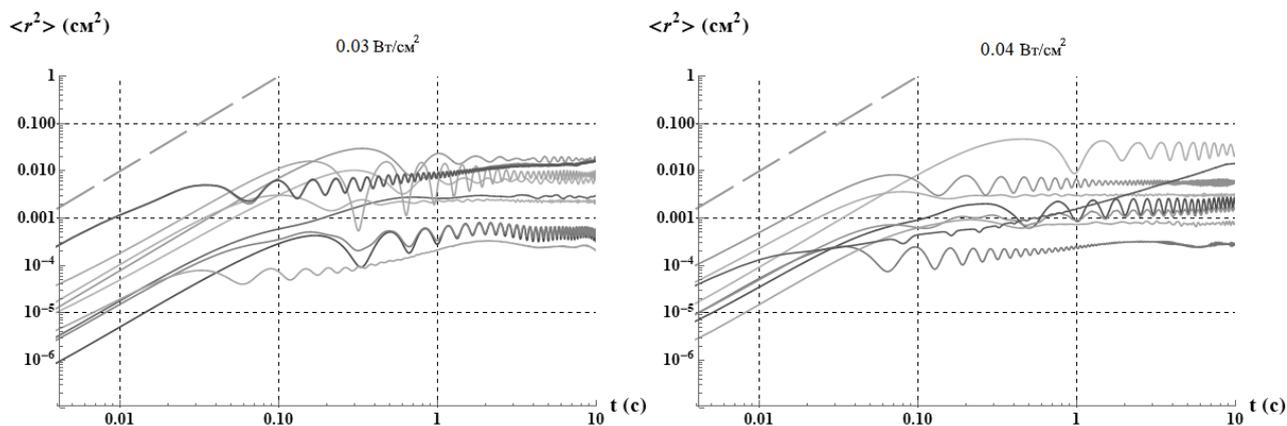


Рисунок 4.5 Среднеквадратичные смещения от времени при различной интенсивности лазерного излучения для янус частиц.

На коротком временном масштабе графики демонстрируют баллистический режим движения с асимптотикой $\sim t^2$ (штриховая 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 вращения из рисунков 4.4 и 4.5 определить нельзя. Однако, из наблюдений можно сделать вывод, что фазы кругового движения частиц не совпадают (см. рисунок 4.1). 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.

Еще одной характеристикой активного броуновского движения является средняя кинетическая энергия частиц. На рисунке 4.6 представлена зависимость от I для кинетической энергии частиц, усредненной по времени ($T=60$ с) и по ансамблю частиц.

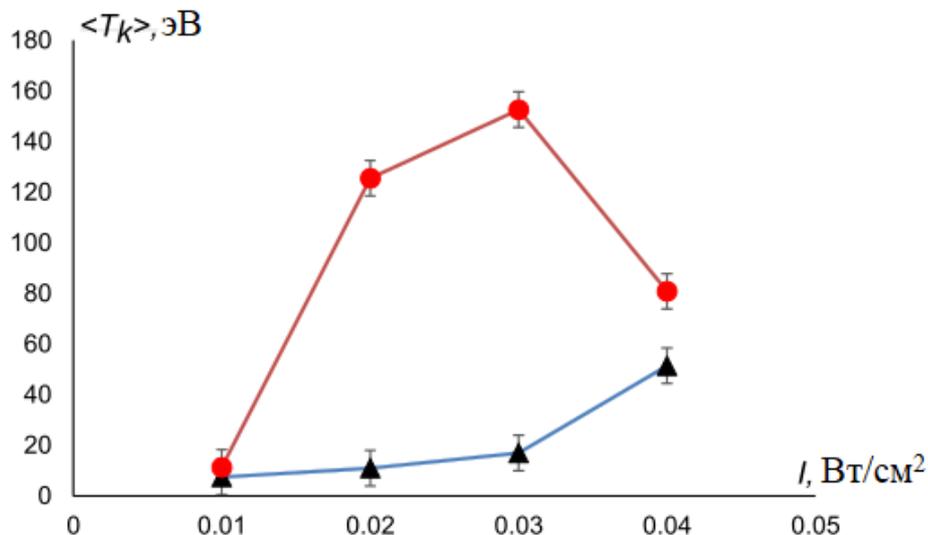


Рисунок 4.6 Зависимость усредненной по времени и по ансамблю кинетической энергии частиц от интенсивности лазерного излучения: треугольники – цепочка из покрытых частиц, кружки – цепочка из янус частиц.

Из рисунка 4.6 видно, что незначительное увеличение интенсивности лазерного излучения приводит к увеличению кинетической энергии частиц на порядок (для покрытых частиц) и более (для янус частиц). Кинетическая энергия янус частиц растет значительно быстрее с ростом интенсивности излучения. При этом при плотности мощности $0,04$ Вт/см² достигается предельное значение кинетической энергии для двух самых энергичных янус частиц, которые покидают цепочечную структуру. С этим связано наблюдаемое уменьшение $\langle T_k \rangle$

при $I = 0.04 \text{ Вт/см}^2$. Следует отметить, что кинетическая энергия микрочастиц значительно превышает среднюю кинетическую энергию атомов буферного газа ($T_n \sim 0.03 \text{ эВ}$), что указывает на активный характер движения.

Исследуемые системы активных броуновских частиц являются существенно открытыми: их динамика обусловлена притоком внешней энергии и преобразованием полученной энергии в кинетическую энергию движения частиц. Поэтому для анализа состояния активных броуновских систем нужны методики, не основывающиеся на термодинамической замкнутости системы. В качестве такого подхода была предложена динамическая энтропия.

Для всех рассмотренных состояний системы из покрытых частиц 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 ε^* выросло на порядок, что говорит о изменении локализации макрочастиц в цепочечной структуре из покрытых частиц 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 ε^* растет, что говорит о изменении локализации макрочастиц 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 покрытых частиц установлено, что при увеличении значений I_p до 0.34 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 покрытых частиц являются активными броуновскими частицами и их активность растет с ростом интенсивности лазерного излучения [2].

Для анализа характера броуновского движения янус частиц в квазиодномерной (цепочечной) 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 I_p общий характер броуновского движения янус частиц в цепочечной структуре изменяется, от характерного активным броуновским частицам направленного движения ($I_p = 0.05, 0.09, 0.19$ Вт/см²) до диффузионного ($I_p = 0.07, 0.13, 0.15$ Вт/см²) и вращательного по замкнутым траекториям ($I_p = 0.54$ Вт/см²). 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) Произведено сопоставление методик двумерной и трехмерной диагностики исследования динамики микрочастиц в коллоидной плазме тлеющего разряда постоянного тока. В результате анализа выявлено, что для качественной оценки среднеквадратичных смещений можно использовать методики анализа, как для двумерного 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 отличии 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%.

2) Показано, что пылевые частицы в трехмерной электростатической ловушке тлеющего разряда постоянного тока под действием лазерного излучения совершают активное броуновское движение, т.е. преобразуют энергию излучения в кинетическую энергию собственного направленного движения. Причиной активного броуновского движения, является фотофорез.

Экспериментально показано, что воздействие лазерного излучения на непокрытую пылевую частицу является наименьшим по сравнению с другими типами частиц. В то же время для пылевых частиц с медным покрытием и янус частиц увеличение мощности лазера приводило к значительному увеличению их кинетической энергии и к расширению области их движения. Траектории пылевых частиц с однородной поверхностью представляют собой суперпозицию вытянутых вдоль направления лазерного луча эллипсов со случайной составляющей. Активное броуновское движение янус частиц может характеризоваться наименьшей регулярностью и наибольшей трехмерностью.

3) Представлены результаты экспериментального исследования 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. С помощью анализа параметров движения (траекторий, среднеквадратичного смещения, кинетической энергии) в зависимости от интенсивности лазерного излучения, падающего на частицы показано, что частицы являются активными броуновскими. При этом возможно управлять их движением без изменения параметров разряда. Экспериментально обнаружено, что формирование цепочечных структур и их устойчивое состояние не нарушается при кинетическом разогреве частиц с ростом их кинетической энергии более чем на порядок. Это свидетельствует о реализации механизма формирования цепочек с сильной связью между частицами, который не объясняется простым кильваторным (ионным) следом за вышестоящей частицей.

Публикации. Опубликовано 5 статей в ведущих зарубежных и российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, первые 3 из них используются в данной работе.

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, № 2.
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.
4. Светлов А.С., Чирков А.Ю. Тепловая устойчивость термоядерной плазмы при различных моделях удержания энергии. *Прикладная физика*, 2016, № 2, с. 25–28.
5. Светлов А.С., Чирков А.Ю. Исследование тепловой устойчивости термоядерной плазмы. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2015, т. 6, № 9–10, с. 437–441

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