

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

УДК 533.9

На правах рукописи

Светлов Антон Сергеевич

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

1.3.9 - физика плазмы

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., проф., академик РАН
Петров Олег Федорович

Москва 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В КОЛЛОИДНОЙ ПЛАЗМЕ	13
1.1 Введение.....	13
1.2 Постановка задачи. Терминология.....	15
1.3 Классификация активных броуновских частиц.....	18
1.4 Механизмы активного броуновского движения.....	21
1.5 Прикладные аспекты исследования активного броуновского движения в коллоидной плазме.....	37
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОЛЛОИДНОЙ ПЛАЗМЫ.....	49
2.1 Экспериментальный стенд для изучения коллоидной плазмы тлеющего разряда постоянного тока.....	49
2.2. Комплекс для трехмерной диагностики в коллоидной плазме	53
2.3. Заключение и выводы по Главе 2.....	60
ГЛАВА 3. АКТИВНОЕ БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ УЕДИНЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА	62
3.1 Движение уединенных микрочастиц в плазме при воздействии лазерного излучения различной мощности.....	62
3.2 Экспериментальные данные	62
3.3. Анализ экспериментальных данных	64
3.4. Заключение и выводы по Главе 3.....	74
ГЛАВА 4. СТРУКТУРЫ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	76

4.1. Квазиодномерные (цепочечные) структуры в плазме тлющего разряда при воздействии лазерного излучения	76
4.2. Экспериментальные данные	77
4.3. Анализ экспериментальных данных	79
4.4 Заключение и выводы по Главе 4	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	102

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

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.

Степень разработанности темы исследования

Сейчас исследования в области коллоидных систем представляют собой развитую междисциплинарную науку, которая объединяет знания в области физики плазмы, астрофизики, механики жидкостей, материаловедения и теории открытых систем активных частиц.

Коллоидная плазма возникает при интродукции в частично ионизированный газ микро- или субмикрочастиц твердого, или жидкого вещества, что приводит к образованию дисперсной системы.

Зарядка частиц в плазме вызывает их привязку в неоднородном электрическом поле и создание нового компонента коллоидной плазмы. Эта коллоидная плазма представляет удобную среду для изучения различных физических коллективных процессов на кинетическом уровне, таких как самоорганизация в системах одно-, двух- и трехмерных волновых процессах.

Исследования активного броуновского движения в тлеющем разряде постоянного тока проводятся для изучения физических свойств активных систем, а также для поиска новых материалов и технологий в области нанотехнологий и биомедицины.

В одном из экспериментов [1], активные броуновские частицы были синтезированы путем введения катионного поверхностного слоя на наночастицах Fe_3O_4 , после чего они были помещены в тлеющий разряд постоянного тока в водном растворе. В результате эксперимента было обнаружено, что частицы проявляют активное броуновское движение, которое было связано с гидродинамическими эффектами, возникающими в результате взаимодействия частиц с ионами газа и электродами разряда.

В другом исследовании [2] было исследовано активное броуновское движение золотых наночастиц в тлеющем разряде постоянного тока в водном

растворе. В этом эксперименте было обнаружено, что размеры и формы частиц оказывают значительное влияние на их активное броуновское движение, которое происходит в результате термофореза и электрофореза.

Таким образом, исследования активного броуновского движения в тлеющем разряде постоянного тока имеют широкий спектр приложений в различных областях науки и технологий, и поэтому они являются активной областью исследований в настоящее время.

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 отсутствии 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

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.

Теоретическая 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 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), в технических целях (разрушения вредных веществ в окружающей среде), в научных целях (исследования самоорганизации и эволюции в коллоидных и плазменно-пылевых системах).

Методология и методы исследования

Исследование динамики и структурных переходов одиночных и систем частиц происходило в тлеющем разряде постоянного тока, формируемого в стеклянной вертикально ориентированной трубке при подаче разницы потенциалов на катод и анод.

Объем вакуумировался при помощи форвакуумного и турбомолекулярного насоса. После чего с использованием систем контроля давления и газонапуска подавался буферный газ, как правило аргон, для установления давления 1 – 100 Па.

Для формирования коллоидной структуры в плазме в эксперименте использовались сферические полимерные монодисперсные меламин-формальдегидные (МФ) частицы, производимые компанией MicroParticles GmbH (Berlin, Germany), а также модифицированные в ВЧ разряде МФ янус-частицы. Диаметр всех частиц был $D \approx 5$ мкм. Для анализа поверхности частиц использован сканирующий электронный микроскоп (РЭМ) FEI Nova NanoSEM 650 (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA USA).

Контейнер с частицами располагался в верхней части стеклянной трубки. При механическом воздействии (встряхивании) через дно цилиндрического контейнера с сеткой производился вброс частиц в область разряда.

Структуры формировались и исследовались в нижней страте положительного столба тлеющего разряда постоянного тока. Стабилизация положения страты осуществлялась при использовании капралоновой вставки конусообразной формы, которая концентрирует поток электронов на оси трубки.

Для подсветки и воздействия на плазменно-пылевую структуру в экспериментах использовалось излучение от двух типов лазера в зависимости от эксперимента, аргоновый газоразрядный с основной длиной волны 488 нм или твердотельный полупроводниковый лазер с длиной волны 532 нм. В экспериментах используются лазеры с минимальным отклонением выходной мощности лазерного излучения для точного и управляемого лазерного воздействия. Также при воздействии на коллоидную систему в исследованиях производится регистрация мощности и профиля распределения интенсивности в пучке лазерного излучения. Внесение регулируемого внешнего воздействия и дальнейшее наблюдение за изменениями изучаемого объекта является одним из часто используемых методов исследования.

Видеорегистрация микрочастиц производилась при помощи двух синхронизированных высокоскоростных видеокамер. Что позволяет получать различные видеоизображений в один момент времени, например, движение микрочастиц в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока. В дальнейшем при использовании компьютерной обработки и специального программного обеспечении полученные видеоданные были обработаны, в результате были получены координаты и восстановлены траектории частиц, рассчитаны среднеквадратичные смещения от времени, средние скорости и кинетическая энергия частиц.

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 отсутствии 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.

В основу диссертации легло 3 статьи опубликованных в ведущих зарубежных и российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, а именно:

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.

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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В КОЛЛОИДНОЙ ПЛАЗМЕ

1.1 Введение

Броуновское движение – это хаотическое движение частицы, взвешенной в жидкости или газе [1]. Этот вид движения описывает окружающую среду в тепловом равновесии, определяемом данной температурой. Не существует предпочтительного направления движения броуновских частиц. Броуновское движение названо в честь ботаника Роберта Брауна, впервые описавшего это явление в 1827 году. *«Изучая микроскопическую жизнь, он заметил маленькие частицы пыльцы растений, покачивающиеся в жидкости, на которую он смотрел в микроскоп, и понял это. достаточно, чтобы понять, что это были не живые существа, а всего лишь маленькие комочки грязи, двигавшиеся в воде»* [1]. Первое научное рассмотрение броуновского движения было дано Альбертом Эйнштейном в 1905 г. [2]. Эйнштейн связал наблюдаемое явление с постоянной случайной бомбардировкой броуновской микрочастицы молекулами (атомами) жидкости. Жан Перрен был удостоен Нобелевской премии в 1908 году за экспериментальное исследование свойств броуновского движения.

Позже в 1945 году И.С. Пригожиным были сформулированы основные принципы физики диссипативных структур [3]. Монографии [4] и [5] содержат обобщенные результаты исследований в этой области. Важным достижением физики диссипативных структур является изучение неравновесных термодинамически открытых систем, которые эволюционируют путем получения вещества и энергии извне, что приводит к качественным параметрическим изменениям. Классическая термодинамика и статистическая физика не способны описать такие скачки. Пригожин провел глубокий анализ уравнения Лиувилля для ансамбля частиц, используя формализм анализа уравнения Шрёдингера. Другим важным результатом теории диссипативных структур является доказательство одной из основных теорем линейной термодинамики неравновесных процессов -

теоремы о минимуме производства энтропии в термодинамически открытой системе. И. С. Пригожин и Гленсдорф сформулировали общий критерий эволюции, известный как Гленсдорфа-Пригожина [6]. Кратко его можно описать следующим образом: термодинамика, при определенных условиях, не только не противоречит теории эволюции, но также может прямо предсказывать возникновение новых структур. Целью авторов при введении этого правила было сформулировать универсальный закон для живой и неживой материи - закон самоорганизации и эволюции всякой открытой системы [7]. Данный закон эволюции описывает процессы самоорганизации как в неживой, так и в живой природе.

Исследования И.С. Пригожина в области самоорганизации диссипативных систем тесно связаны с концепциями упорядоченности и хаоса [3]-[12]. Диссипативные системы характеризуются спонтанным возникновением сложной структуры, которая может выглядеть внешне довольно хаотичной. Примерами таких систем могут служить ячейки Бенара, лазеры, капельные кластеры, реакция Белоусова — Жаботинского, циркуляция атмосферы и даже биологическая жизнь. Основные различия между физикой активных броуновских частиц и физикой диссипативных структур заключаются в характере объектов, которые изучаются. В случае активных броуновских частиц исследуются корпускулярные объекты, тогда как в физике диссипативных структур рассматриваются непрерывные объекты. Несмотря на это, объекты исследования в обоих случаях имеют сходство и связаны с процессами эволюции.

1.2 Постановка задачи. Терминология

В данном разделе 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.

Один из ключевых терминов, связанных с активным броуновским движением, - это "активные частицы". Активные частицы представляют собой микроскопические или наномасштабные объекты, которые обладают встроенной способностью к самодвижению. Они могут быть биологическими микроорганизмами, такими как бактерии или эукариотические клетки, или синтетическими структурами, специально разработанными для активного движения.

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.

В рамках исследования активного броуновского движения, также используются термины, связанные с механизмами движения активных частиц, такими как "самодвижение", "самопропульсия" и "самореализация". Эти термины указывают на способность активных частиц генерировать собственную энергию и преобразовывать ее в движение.

Важно отметить, что терминология активного броуновского движения может варьироваться в зависимости от конкретной области исследования. Различные научные дисциплины, такие как физика, биология, химия и материаловедение, могут использовать различные термины для описания активного броуновского движения в своих специфических контекстах.

Как говорилось выше, классические броуновские частицы находятся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, в отличие от активных броуновских частиц. Частицы, способные преобразовывать энергию окружающей среды в энергию собственного направленного движения, называются активными броуновскими частицами (или самодвижущимися броуновскими частицами) [13], [14]. Самосогласованное движение активных частиц обычно называют активным движением. Примеры активных частиц включают некоторые бактерии, подвижные клетки [15], [16], [17], микро- и нанороботы [18], активные микрокатализаторы [19], [20], [21], микрокапли в эмульсии [22], [23], пылевые частицы в разрядной плазме и сверхтекучем гелии [24]-[28] и др.



Рисунок 1.1 Примеры активных броуновских частиц естественного (а), (б) и искусственного (в) – (ж) происхождения: (а) – подвижная клетка (сперматозоид);

(б) – бактерия (кишечная палочка); (в) – двусоставная микропроволочка катализатор (янус-проволочка); (г) – сферическая янус-частица; (д) – хиральная частица; (е) – пузыри в жидкости; (ж) микро- (нано-) роботы.

Активные частицы могут двигаться как самостоятельно, так и проявлять коллективную природу [15], [29]. Средняя кинетическая энергия активных частиц может значительно превышать среднюю кинетическую энергию (температуру) окружающей среды, что свидетельствует о значительной неравновесности процесса [13]. Основными механизмами действия микрочастиц являются: химические реакции [20]-[21]; эффект Марангони [22]; квантовые эффекты [28]; силы ионного увлечения и силы фотофореза в коллоидной плазме [24] - [27]; внешние электромагнитные поля [23] и др.

Основным объектом исследования активных броуновских частиц являются химически активные коллоидные системы [21]-[27]. Изначально, главным мотивом таких исследований были химические приложения, особенно в создании новых катализаторов для химических процессов. Однако фундаментальные исследования активных броуновских частиц в химически активных коллоидах сталкиваются с несколькими принципиальными трудностями. Одной из главных проблем является сложность химических процессов, которые происходят в таких системах. Другими словами, параметры процессов в химически активных средах тесно связаны друг с другом, и анализ активного броуновского движения с независимыми параметрами представляет собой нетривиальную задачу. В этом контексте, пылевая (коллоидная) плазма представляет собой перспективный объект исследования. В отличие от химически активных систем, параметры пылевых частиц в плазме остаются постоянными, а активность частиц может быть легко инициирована с помощью лазерного излучения. Разрядная плазма также является термодинамически открытой системой, находящейся в далеком от равновесного состояния. Поэтому коллоидная плазма является удобным объектом для изучения активных броуновских частиц [25]. С одной стороны, в плазме, по сравнению с электролитами, химические реакции играют гораздо меньшую роль, что позволяет

более точно контролировать параметры процесса. С другой стороны, значительно более низкая вязкость плазмы позволяет использовать слабые источники активной энергии движения.

Цель данной диссертационной работы заключается в изучении динамики активных броуновских частиц в плазме. В последующих разделах мы рассмотрим специфику движения таких частиц, включая механизмы активности, а также особенности пылевой плазмы в качестве объекта для исследования активности.

1.3 Классификация активных броуновских частиц

Одной из ключевых особенностей активного броуновского движения является его непредсказуемость и случайность, подобно классическому броуновскому движению. Однако в отличие от пассивных частиц, активные частицы могут самостоятельно изменять направление и скорость своего движения, создавая нетипичные траектории и коллективные явления.

Активные броуновские частицы могут быть классифицированы по различным критериям, включая механизмы движения, тип активации и источник энергии. Рассмотрим основные типы классификации.

По механизму движения:

- Активные броуновские частицы с флаголлами: например, бактерии, которые используют жгутики или волосковые отростки для активного плавания [29].
- Активные броуновские частицы с псевдоподиями: некоторые амебообразные организмы или клетки могут использовать псевдоподии для передвижения [30].
- Активные броуновские частицы с двигателями: это включает искусственные частицы, такие как самоупорядочивающиеся коллоидные частицы или микророботы, которые используют встроенные двигатели или механизмы для активного движения [31].

По типу активации:

- Биологические: например, бактерии или сперматозоиды, которые активируются внутри живого организма или в условиях, схожих с биологическими системами [32].

- Синтетические: это искусственные частицы, созданные в лабораторных условиях и активируемые с помощью химических реакций или внешних стимулов, таких как изменение pH или освещение [33].

По источнику энергии:

Хематические: энергия активными броуновскими частицами получается из химических реакций, происходящих в окружающей среде или внутри самих частиц.

Оптические: энергия поступает из светового излучения, например, с помощью оптического освещения или использования лазеров.

Электрические: активные броуновские частицы получают энергию из электрических полей или электрического тока, который используется для их активации и движения.

Существует также класс активных частиц, известных как "социальные частицы", которые могут взаимодействовать между собой и образовывать коллективное поведение [35]. Это может приводить к эмерджентным явлениям, таким как самоорганизация, синхронизация и образование паттернов движения [36].

Одним из основных вопросов, связанных с активным броуновским движением, является его физическая природа и механизмы, обеспечивающие активность частиц. Различные механизмы активного движения включают хемотаксис, фотоактивацию, деформацию, диффузию и внешнее управление.

Исследования активного броуновского движения имеют большое значение для понимания основных принципов движения и взаимодействия в

микроскопическом масштабе. Это имеет потенциальное применение в различных областях, включая микро- и нанороботику, микроэлектронику, биомедицину, микрофлюидику и другие.

Система активных броуновских частиц может получать энергию из внешнего источника и преобразовывать ее в кинетическую энергию движения [13]. Это приводит к появлению свойств, характерных только для движущихся систем, таких как способность к самопередвижению, самовосстановлению и роению (англ. swarming). На систему можно оказывать воздействие извне, используя электрические и магнитные поля, а также гидродинамические потоки. В результате этого возникают силы и вращательные моменты на частицах в объеме среды и на границе раздела фаз. Кроме того, можно сообщать энергию изнутри, используя химические реакции, ультрафиолетовое или гамма-излучение. Микропловцы и янус-частицы (ассиметричные частицы) могут быть индуцированы подобным способом.

Активные частицы, включая биологические агенты и искусственные коллоиды, часто движутся в определенном направлении, которое определяется их пространственной конфигурацией (голова-хвост) [36]. Эта асимметрия типична для более высоких организмов, но может также наблюдаться у клеток, управляемых полярным актиновым цитоскелетом [37]. В некоторых случаях, направление движения может быть определено движущим механизмом, как например у моторных белков, таких как миозин и кинезин, которые движутся вдоль актина и микротрубочек внутри клетки [38].

Активные броуновские частицы, включая микропловцы и янус-частицы, также могут получать энергию извне и преобразовывать ее в кинетическую энергию движения, что приводит к явлениям, характерным только для движущихся систем, таким как самопередвижение, самовосстановление и свойство роения.

Различные внешние и внутренние силы могут вызывать движение коллоидных систем, содержащих твердые микро- и наночастицы. Одним из

практических применений этого явления являются искусственные микропловцы - коллоидные частицы, которые могут перемещаться в жидкости, подобно живым микроорганизмам. Обычно они имеют размеры от 1 до 10 мкм и, в отличие от природных организмов, не имеют движущихся частей. Вместо этого, искусственные микропловцы взаимодействуют с окружающей средой через химические реакции, которые создают химический, электрический или тепловой градиент вблизи своей поверхности и используют полученную энергию для движения.

Таким образом активные броуновские частицы могут быть классифицированы по нескольким критериям, включая механизмы движения, тип активации и источник энергии.

Классификация активных броуновских частиц играет важную роль в понимании их свойств, поведения и потенциальных приложений. Она позволяет исследователям систематизировать их разнообразие и определить основные характеристики. Классификация также способствует разработке новых материалов и технологий, основанных на активных броуновских частицах.

Однако стоит отметить, что классификация активных броуновских частиц все еще является активной областью исследования, и с развитием новых научных открытий и технологических прорывов могут возникать их новые типы и подтипы, расширяющие наше понимание и возможности применения этих уникальных частиц.

1.4 Механизмы активного броуновского движения

Исследование механизмов активного броуновского движения представляет собой важный раздел для диссертационного исследования, так как он позволяет расширить наше понимание физических и биологических процессов, лежащих в основе движения микроскопических частиц в различных системах.

Кинематические свойства активных броуновских частиц могут существенно различаться от тех, что присущи классическим броуновским частицам. Для

иллюстрации этого явления рассмотрим пример из области микробиологии. Научные исследования показывают, что многие бактерии обладают подвижностью и способны к самостоятельному перемещению. Существует определенный класс бактерий, проявляющих "беговое движение": они движутся прямолинейно на некоторое расстояние в течение длительного времени, затем резко меняют направление и снова продолжают движение прямолинейно. Динамика такого движения, с одной стороны, напоминает броуновское движение, но с другой стороны, обладает важными особенностями.

Одна из этих особенностей заключается в том, что динамические характеристики, такие как скорость и частота разворотов, зависят от условий окружающей среды и, следовательно, могут изменяться в пространстве [39]. В установившихся условиях движение бактерий может становиться стационарным, что подразумевает наличие перехода от одного стационарного состояния к другому. Однако последовательность стационарных состояний не является инвариантной относительно обращения времени. В отличие от систем в тепловом равновесии, где принцип детального баланса восстанавливает микроскопическую симметрию обращения времени, подвижные бактерии и другие активные броуновские частицы не обладают этим детерминированным балансом. Отсутствие детерминированного баланса, обеспечиваемого потоком химической энергии, которая является движущей силой подвижности, может создавать своеобразные "ловушки" при моделировании таких процессов.

Существует ещё одна разновидность броуновского движения – горячее броуновское движение (англ. «*Hot*» *Brownian Motion*). Если вы когда-либо наблюдали маленькие частицы в жидкости или газе, вы, возможно, заметили, что они непрерывно двигаются вокруг, меняя направление и скорость. Этот феномен называется горячим броуновским движением. Горячее броуновское движение является одной из важных концепций в физике и имеет широкий спектр применений в различных областях науки.

Горячее броуновское движение названо в честь Роберта Броуна, шотландского ботаника, который первым описал этот феномен в 1827 году [40], наблюдая движение частиц пыльцы в воде. Он заметил, что частицы перемещались в случайных направлениях и были подвержены постоянным столкновениям со средой. Это наблюдение привело к развитию теории, объясняющей 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.

Одним из знаменитых экспериментов, связанных с горячим броуновским движением, является эксперимент Жана Перрена и Альберта Эйнштейна [2], который подтвердил существование атомов и молекул. Перрен и Эйнштейн изучали движение микроскопических частиц, таких как пыльца, в жидкости. Их работы привели к разработке математической модели, известной как формула Эйнштейна для горячего броуновского движения. Формула Эйнштейна позволяет вычислить среднее расстояние, пройденное частицей за определенное время и использовалась для определения размеров атомов и молекул.

В статье [41] авторы представляют подробное исследование явления горячего броуновского движения и его влияния на диффузию и распространение вещества в различных системах (рисунок 1.2).

Авторы предлагают математическую модель, которая учитывает эффекты теплового движения и столкновений частиц с молекулами окружающей среды. Они используют стохастические уравнения, такие как стохастическое уравнение Ланжевена или стохастическое уравнение Фоккера-Планка, для описания движения частиц в горячем броуновском движении. Эти уравнения позволяют учесть случайные флуктуации и тепловые эффекты, вносящие изменения в движение частиц. Затем авторы проводят численные эксперименты для изучения свойств горячего броуновского движения. Они исследуют такие характеристики, как среднеквадратичное отклонение частиц, корреляционные функции, вероятности пересечения границы и другие параметры, чтобы получить полное представление о поведении частиц в системе горячего броуновского движения. Кроме того, статья обсуждает применение горячего броуновского движения в различных областях. Одной из областей является нанотехнологии, где горячее броуновское движение может быть использовано для манипулирования наночастицами и управления их перемещением. Авторы также рассматривают применение горячего броуновского движения в микрофлюидике, где его эффекты на течение жидкости в микроскопических каналах могут быть значимыми.

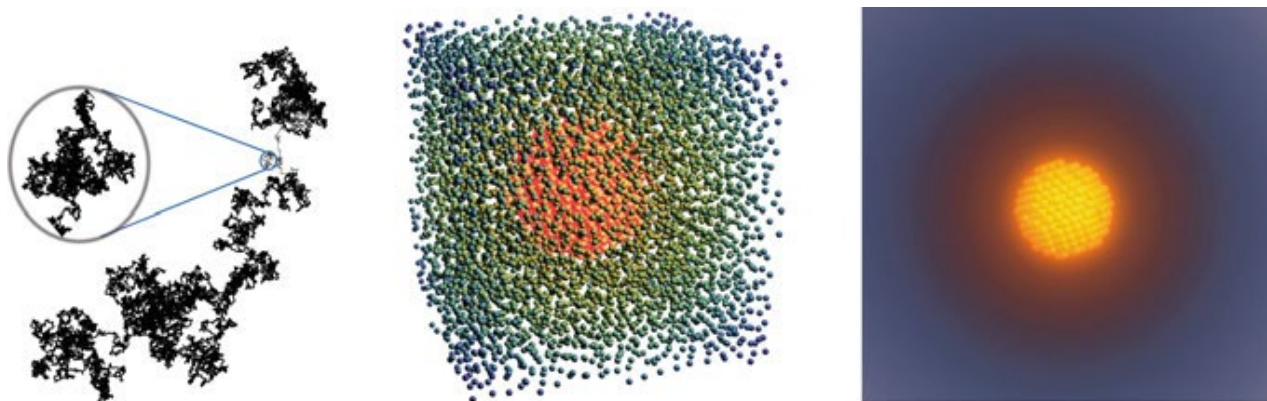


Рисунок 1.2 Левая часть: траектория горячей броуновской частицы (при больших временах $t \gg m\zeta$) является "диффузным" фракталом, как и в случае

обычного броуновского движения, только проходит быстрее; она нигде не дифференцируема, поэтому скорость не определена. Средняя часть: снимок атомистической не равновесной молекулярной динамической симуляции с горячей наночастицей в жидкости Леннарда-Джонса (частицы закодированы цветом в соответствии с их кинетической энергией или "молекулярной температурой"). Правая часть: грубо сглаженные поля молекулярной температуры и вязкости, $T(r)$ и $\eta(r)$, вокруг равномерно нагретой сферической наночастицы радиусом R .

Горячее броуновское движение является одним из примеров фундаментальных процессов в природе, которые могут быть изучены для развития новых технологий и применений в различных областях науки и промышленности.

Также было исследовано движение микропловцов. Изучение микропловцов имеет долгую историю, которая насчитывает свои корни в 17 веке, когда они впервые были изучены под микроскопом голландским ткачом Антони ван Левенгуком. Однако только гораздо позже, начиная с систематических исследований, таких как те, что провели Роберт Браун и Адольф Броньяр в начале 19 века, исследователи медленно осознали влияние броуновского движения на микромасштабное плавание, и значительная часть пионерской работы была посвящена разделению этих двух эффектов. Таким образом, изучение так называемых "анималекул" и их самоудержания предшествовало изучению молекул и их теплового движения, и то, что началось как исследование первого, в конечном итоге подтвердило существование последнего. Существуют убедительные внутренние причины для обратного следования по историческому пути и расширения (уже установленного) анализа броуновского движения на плавание. Неизотермические условия автоматически превращают все термально асимметричные частицы в горячих пловцов. Примером горячего микропловца является полусфера янус, покрытая золотом [42], как показано на рисунке 1.3 (слева).

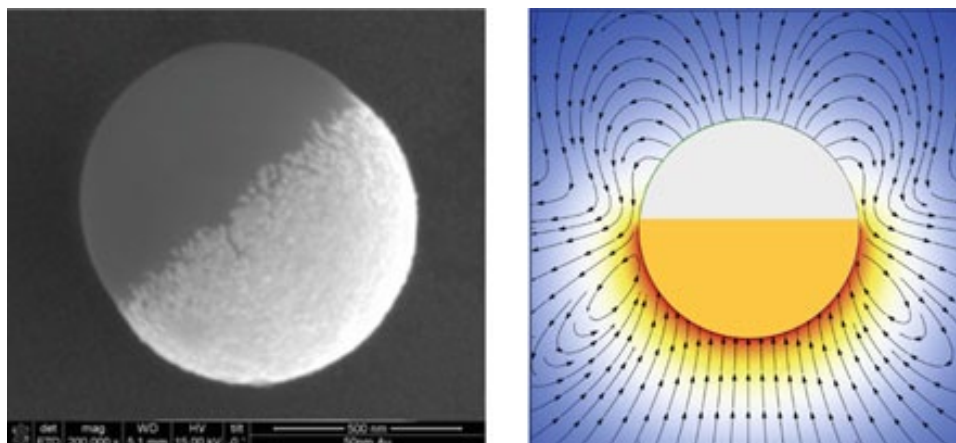


Рисунок 1.3 Слева: изображение 1-микрометровой янус-частицы из полистирола с покрытием из золотой пленки толщиной 50 нм на одной полусфере. Справа: контурные линии вокруг моделируемого (без силы) горячего янус-пловца рассчитанные в приближении граничного слоя.

Такая частица нагревается асимметрично и, следовательно, вызывает асимметричный градиент температуры в окружающем растворителе, когда ее освещают зеленым лазером. Градиент температуры, в свою очередь, вызывает поток в граничном слое вдоль поверхности частицы [43], что приводит к чистому дрейфовому движению частицы вдоль ее оси симметрии. Тот же механизм отвечает за термофоретическое движение во внешнем градиенте температуры, но здесь градиент вызван самой горячей частицей. Поэтому также говорят о самофорезе [44].

Альтернативные математические описания явления с помощью принципа Ферма (лучевая оптика) и уравнения Гельмгольца (волновая оптика) находят свои совершенные аналоги в классической (принятой Резерфордом) и полной квантово-механической (с использованием уравнения Шредингера) трактовках кулоновского уравнения. проблема рассеяния. Фотоны отклоняются фотонным потенциалом $\epsilon(\mathbf{r})$ точно так же, как резерфордовские α -частицы отклонялись кулоновским взаимодействием с атомными ядрами.

На рисунке 1.4 слева зеленый лазерный луч, входящий в куб слева, нагревает небольшую металлическую сферу, встроенную в акриламидный блок.

Возникающий профиль показателя преломления вокруг металлической сферы исследуется красным лазерным лучом, проходящим на расстоянии b от центра рассеяния, соответствующем параметру столкновения в анализе Резерфорда его эксперимента. Луч отклоняется на угол θ , связанный с параметром рассеяния соотношением $\cot(\theta/2) \propto b$. Фотонное рассеяние Резерфорда таким образом исследует профиль показателя преломления так же, как Резерфорд исследовал закон Кулона (и возможные отклонения от него), за исключением того, что значительного обратного рассеяния нет, так как изменения показателя преломления относительно вакуумного значения обычно очень слабы.

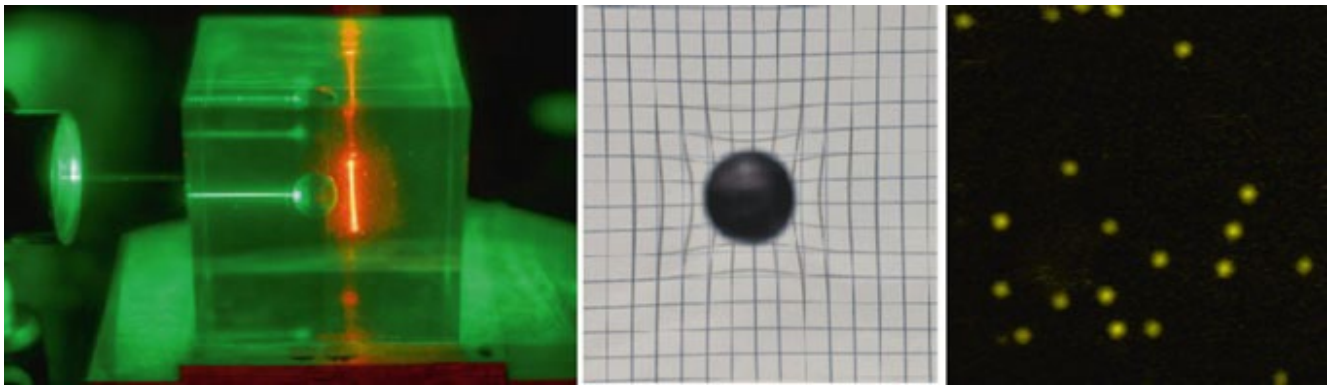


Рисунок 1.4 Принцип фототермального обнаружения. Слева: макроскопический эксперимент, демонстрирующий фототермический вариант резерфордовского рассеяния: металлическая сфера диаметром 1 см, встроенная в акриламидный куб с длиной ребра 10 см, нагревается зеленым лазерным лучом слева; возникающий «мираж» обнаруживается красным лазером. В центре: искажает прямоугольную сетку, сфотографированную через акриламидный блок. Справа: по тому же принципу фототермическая сканирующая микроскопия визуализирует мельчайшие наночастицы золота (10 нм), внедренные в полимер.

Это подтверждает, что форе́з, как и любой вид плавания, является бессиловым видом движения или самодвижения, и позволяет хорошо аналитически контролировать взаимные гидродинамические взаимодействия пловцов и связанное с ними интересное поведение вблизи стен и препятствий [45].

Также существуют другие исследования микроплавцов. В работе [46] использовались никелевые сферы диаметром 100 мкм, которые являются ферромагнитными. Они были размещены на границе между водой и воздухом. Частицы подвергались воздействию внешнего магнитного поля, частота которого составляла 140 Гц, а амплитуда - 80 кА/м. Магнитное поле было направлено перпендикулярно к границе раздела сред. При определенных значениях частоты f и амплитуды поля H_0 наблюдался процесс самосборки частиц в структуры, называемые "магнитными змеями". Эти змеевидные объекты представляли собой подвижные линейные цепочки сфер, упорядоченных по магнитному полю (рисунок 1.5). Расстояние между сегментами "змеи" (обозначаемое как λ) зависело от частоты поля f , а ширина "змеи" (обозначаемая как W) определялась амплитудой H_0 . Взаимосвязь поля и расстояния λ можно описать эмпирическим соотношением: $f^2 \approx \frac{g}{2\pi\lambda} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda^3}$, где g – ускорение свободного падения, ρ – плотность жидкости, σ – поверхностное натяжение.

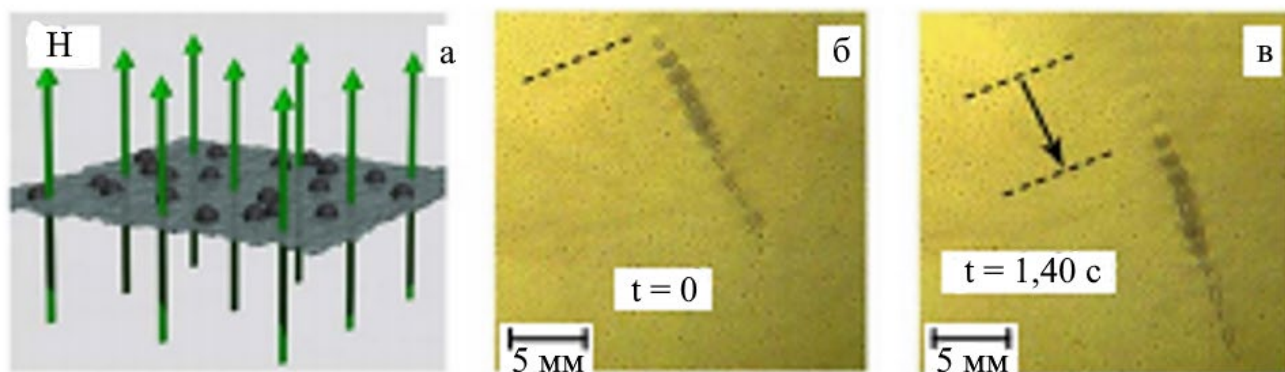


Рисунок 1.5 Однородное переменное магнитное поле и ферромагнитные частицы на поверхности воды (а), магнитная «змея» из ферромагнитных частиц (б, в).

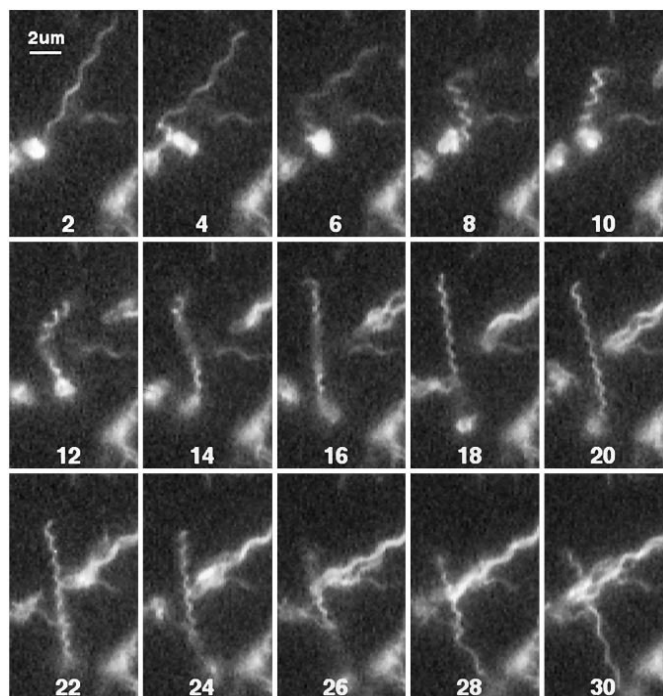
При низких частотах f "магнитные змеи" остаются неподвижными. Движение и скорость частиц могут быть контролируемы с помощью магнитного поля. Что интересно, такие частицы способны захватывать и перемещать другие частицы, включая немагнитные. В перспективе подобные самодвижущиеся системы могут быть использованы в медицине для направленного транспорта лекарственных веществ и др.

Рассмотрим и другие механизмы активного броуновского движения.

Биологические:

Бактериальное движение: многие виды бактерий обладают жгутиками, которые служат им в качестве привода для активного плавания (см. Рисунок 1.2(a)). Хвостовой жгутик, состоящий из флагеллина, обеспечивает создание силы и продольные колебания, способствующие передвижению бактерий [47].

а)



б)

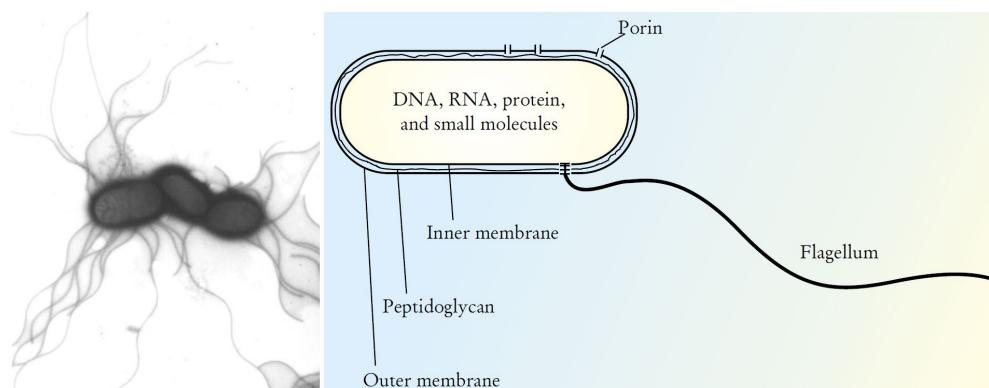


Рисунок 1.6 – а) Клетка кишечной палочки с одним жгутиковым флагеллином, визуализированная с помощью флуоресцентной микроскопии,

каждая точка отличается на 120 секунд от предыдущей. б) Трехклеточный кластер *Salmonella typhimurium* и рисунок *Escherichia coli*, показывающий один усеченный жгутик и три порина (белковые каналы, обеспечивающие поступление водорастворимых питательных веществ). Типичная клетка имеет до шести жгутиков и сотни поринов.

Амебообразные движение: Некоторые амебообразные организмы, такие как амебы, используют псевдоподии - временные выступы клетки - для передвижения. Эти выступы формируются за счет активных преобразований клеточного цитоскелета [48].

Физические механизмы движения:

Движение с помощью химических градиентов: некоторые активные частицы могут двигаться в ответ на градиенты концентрации химических веществ в окружающей среде (см. Рисунок 1.6 (б)). Этот механизм известен как хемотаксис и является основой для движения многих микроорганизмов, таких как бактерии и сперматозоиды [49].

Активное движение с помощью внутренней энергии:

Некоторые активные броуновские частицы способны использовать внутреннюю энергию для активного движения. Это может быть достигнуто за счет концентрационных градиентов, фазовых переходов или биохимических реакций [14].

Влияние магнитных полей на активное броуновское движение:

Исследование активного броуновского движения магнитных частиц под воздействием внешнего магнитного поля. В работе [50] показано, что магнитное поле может контролировать ориентацию и скорость движения частиц, а также вызывать коллективное движение и формирование структур.

В исследовании, проведенном в работе [51], было экспериментально исследовано воздействие электрического поля на систему проводящих частиц

бронзы диаметром 100 мкм, находящихся в растворе спирта в толуоле. Изменение напряженности поля или концентрации спирта вызывало движение структур, как показано на рисунках 1.7 (а-в). Когда направление поля менялось, вращающиеся вихри превращались в пульсирующие кольца, что показано на рисунках 1.3 (г-и). В экспериментах с частицами диаметром 2-3 мкм (сферы из золота) также были наблюдаены дендритные структуры и самособирающиеся нити [52].

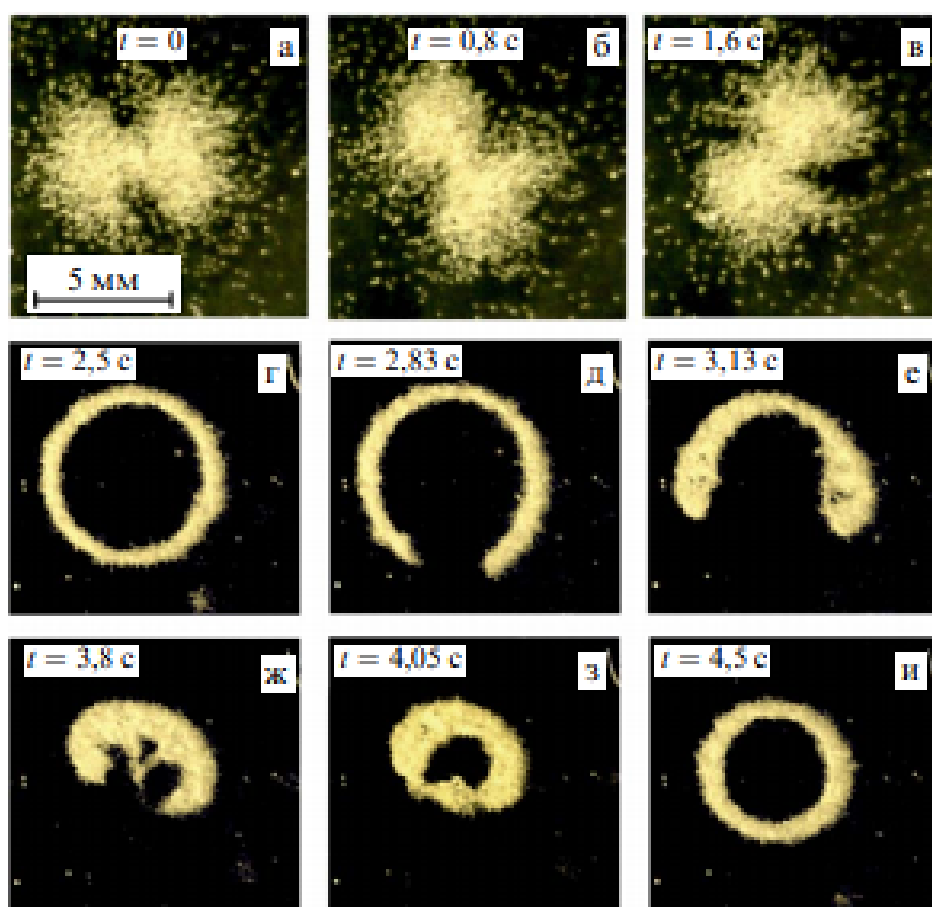


Рисунок 1.7 – Вращающийся бинарный вихрь-звезда (а-в), пульсирующие кольца (г-и).

Прямой контакт магнитных полей с коллоидной системой отсутствует, и они не вызывают электрохимических реакций. Применение магнитного индуцирования возможно благодаря магнитным свойствам коллоидных частиц. Коллоидные частицы должны быть магнитными или содержать магнитные домены (парамагнетики и ферромагнетики), чтобы реагировать на магнитное поле. При наличии постоянного магнитного поля возможно образование цепочечных

кластеров и объемных коллоидных кристаллов. При изменении магнитного поля сложность образующихся структур возрастает: от самособирающихся микропловцов до квазистатических листов и мембран.

Также исследовано влияние электрического поля на активное броуновское движение коллоидных частиц. В работе [53] показали, что электрическое поле может вызывать ориентацию и движение частиц, а также индуцировать коллективное движение и образование порядка.

В работе [54] представили концепцию использования магнитоэлектрических материалов для создания активных броуновских частиц. Они показали, что магнитные и электрические поля могут быть использованы для манипулирования движением и сборки частиц в цепочки (рисунок 1.8).

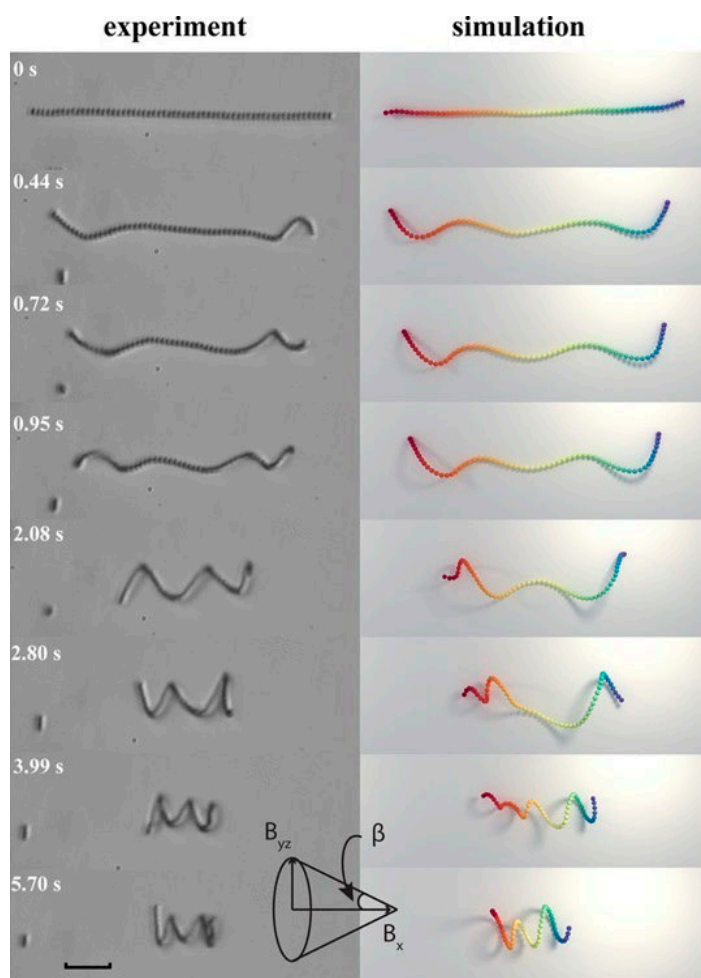


Рисунок 1.8 Выстраивание магнитных цепочек под воздействием прецессирующих магнитных полей. Снимки, показывающие динамику

складывания цепочки в экспериментах (слева) и в симуляциях (справа). (шкала, 10 мкм.)

Преобразование между различными морфологиями цепи и режимами передвижения, полностью контролируемое внешними магнитными полями, позволяет этим коллоидным цепям с высоким аспектным отношением перемещаться в сложных трехмерных средах, таких как длинные и изогнутые каналы и узкие каналы, аналогичные капиллярным кровеносным сосудам.

Воздействие излучением:

В исследовании, проведенном в работе [55], было изучено движение частиц из полистирола, частично покрытых золотом (янус-частиц) с толщиной покрытия 25 нм. Частицы диаметром 1 мкм формировали монослой между двумя стеклянными пластинками (рисунок 1.9). Путем поглощения лазерного излучения покрытой частью частицы создавался местный температурный градиент, что приводило к реализации эффекта "само-термофореза" (англ. self-thermophoresis) - термофоретического движения без наличия внешнего температурного градиента, что приводило к перемещению частицы по термофоретическому эффекту.

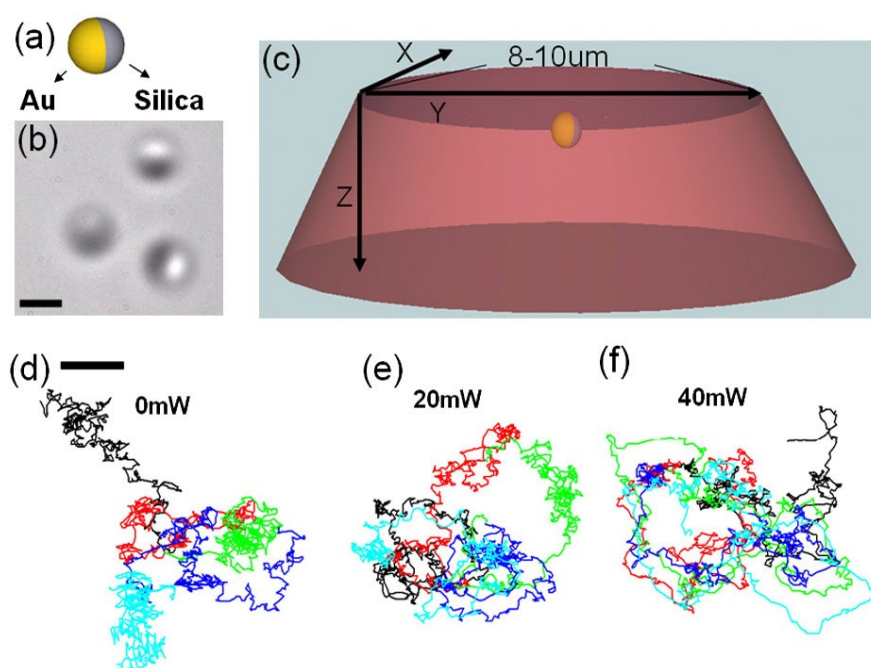


Рисунок 1.9 Схема янус-частицы (a), янус-частицы под микроскопом (b), схема янус-частицы в камере, красная область освещается лазером (c), траектории

янус-частиц в течение 10 секунд в плоскости XY при различных мощностях лазера (d-f).

Движение янус-частиц при воздействии лазера может быть обусловлено термофоретической силой. Для сферических коллоидных частиц из однородного материала не существует поверхностного градиента температуры и не возникает самопроизвольно термофоретическое движение, характерное для неоднородных частиц, состоящих из фрагментов с различной фотокаталитической активностью [56]. Интенсивность движения частицы определяется разностью показателей тепло- и электропроводности её частей, а также удельной площадью ее поверхности [57].

Моделирование и теоретические подходы:

Моделирование активных броуновских частиц играет важную роль в изучении их движения. Некоторые подходы включают статистические модели, такие как модель случайного блуждания, а также модели с учетом взаимодействий и неколлоидных эффектов [58]. В данной работе подробно сравнили два различных, но связанных класса самодвижущихся частиц: активные броуновские частицы и частицы с перемешиванием и перемещением (это тип самодвижущихся частиц, которые перемещаются путем последовательного движения вперед (с периодическими "пробежками") и случайного изменения своего направления движения (с помощью "перемешивания" или "переворота")). Они отличаются только в деталях своей угловой релаксации (непрерывной или дискретной). Сначала рассмотрели задачи с одним телом, включающие неподвижные частицы в однородных полях (например, гравитации) или изотропных гармонических ловушках. В обоих случаях, при достаточно слабых силах, существует "эффективный равновесный" режим, в котором характерная длина, определяемая балансом внешних и приводящих сил, является большой по сравнению с длиной перемещения, определяемой как расстояние, которое свободная частица может пройти за время своей ориентационной релаксации.

В статье [59] исследователи использовали численные симуляции для изучения движения активных частиц на изогнутых поверхностях разной кривизны. Они исследовали, как изменение кривизны поверхности влияет на коллективное поведение активных частиц и их динамику.

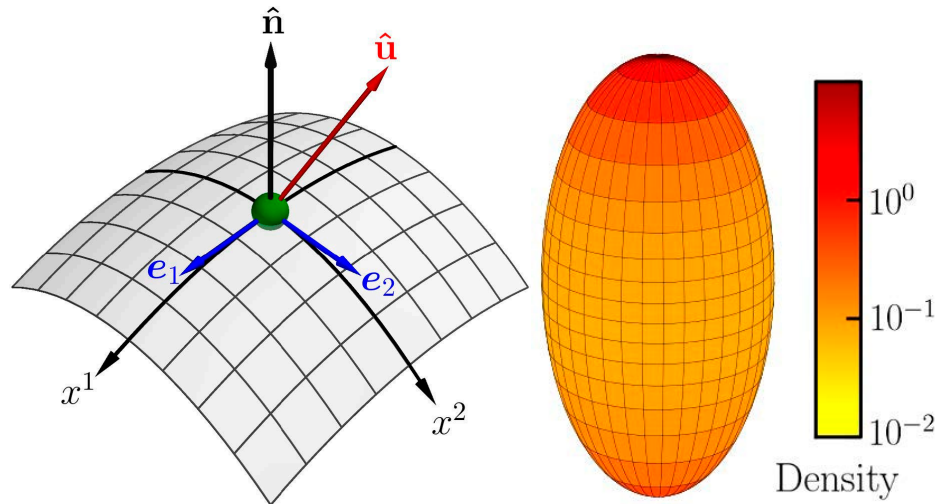


Рисунок 1.10 Слева: геометрические обозначения. \hat{n} — нормаль плоскости. $(e_1; e_2)$ — локальный базис касательной плоскости, связанный с координатами $x_1; x_2$. Частица (зеленый шар) движется по проекции ее ориентации \hat{u} на поверхность. Справа: цветная схема прогнозируемой плотности частицы в форме вытянутого сфероида (подробнее в тексте).

Исследователи обнаружили, что на изогнутых поверхностях активные частицы (рисунок 1.10) могут образовывать различные структуры и коллективные движения. Они изучали различные типы поверхностей, включая положительно и отрицательно изогнутые поверхности, и обнаружили, что кривизна поверхности имеет существенное влияние на формирование и организацию активных частиц.

Теории активного движения: Различные теоретические подходы разработаны для объяснения активного броуновского движения, включая гидродинамические модели, модели с учетом нелинейности и модели коллективного движения. Эти теории помогают понять физические принципы, определяющие движение активных броуновских частиц [60].

Когда активные броуновские частицы находятся вблизи друг друга, возникают коллективные эффекты, которые приводят к формированию различных структур и движений. Эти эффекты могут быть вызваны притяжением, отталкиванием или взаимодействием через окружающую среду.

Активные броуновские частицы могут проявлять коллективное направленное движение или миграцию. Это может происходить благодаря взаимодействию между частицами, которое приводит к созданию поля или градиента, ориентированного в определенном направлении. Частицы в такой системе начинают двигаться в направлении градиента, образуя волну или поток активных частиц.

Одно из направлений изучения коллективных эффектов является образование кластеров активных частиц. Кластеризация активных броуновских частиц представляет собой явление, при котором активные частицы объединяются в стабильные группы. Одно из экспериментальных исследований, демонстрирующих кластеризацию активных частиц [61]. Исследователи проводили численное моделирование и эксперименты с коллоидными частицами, которые были способны к активному движению. Они обнаружили, что в определенных условиях взаимодействия и концентрации частиц происходит кластеризация, то есть образование стабильных групп частиц. Эти кластеры могут двигаться синхронно и менять свою форму со временем. Кроме того, в статье также рассматривается фазовое разделение в системах активных коллоидных частиц, при котором образуются области с различной концентрацией частиц.

Таким образом мы понимаем, что существует большая вариация возможных механизмов активного броуновского движения. Целью данной работы является исследование активного броуновского движения в разрядной плазме, поэтому рассмотрим в следующем параграфе основные ее свойства и прикладные аспекты.

1.5 Прикладные аспекты исследования активного броуновского движения в коллоидной плазме

Основными компонентами окружающего мира являются плазма и пыль. Согласно современным данным, плазма составляет более 99,9% видимого вещества во вселенной. Плазма может образовываться при ионизации звезд и при высоких температурах, также ионизация может происходить в туманностях, межзвездном газе и пылевых облаках в результате воздействия ультрафиолетового излучения. При взаимодействии плазмы и пыли возникает новый объект для исследования - система, включающая заряженные частицы пыли, помимо характерных носителей зарядов (электронов и ионов). Заряженные частицы пыли могут значительно влиять на свойства плазмы, которую они содержат. Такая плазма обычно называется "пылевая плазма" (англ. dusty plasma), а также может использоваться термины "комплексная плазма", "коллоидная плазма" или "плазма с конденсированной дисперсной фазой".

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. Пассивные броуновские частицы могут изменять свое поведение только при изменении параметров окружающей среды, тогда как активные могут изменять свое поведение при воздействии на них лазерного излучения при неизменных параметрах среды. Воздействие плазмы может приводить к изменению свойств макрочастиц, что в свою очередь может приводить к изменению их поведения в пылевых структурах и способности к самоорганизации при внешних воздействиях.

Пылевая плазма, известная также как коллоидная или комплексная плазма, представляет собой ионизированный газ, который содержит заряженные

микрочастицы, состоящие из твердых (и иногда жидких) веществ. Объем плазмы значительно превышает размеры Дебаевского радиуса (обозначаемого как λ_D^3 , где λ_D – радиус Дебая). В разрядной пылевой плазме радиус Дебая обычно определяется ионной популяцией, и поэтому $\lambda_D \approx \lambda_{Di}$. В настоящее время пылевая плазма обнаружена как в космических условиях (в частицах кометных хвостов, межпланетных и межзвездных облаках, планетарных кольцах и около искусственных спутников Земли), так и на Земле в различных технологических устройствах, использующих плазменные технологии (например, в области стенок токамаков, плазменных реакторах и т.д.). Кроме того, пылевую плазму создают в лабораторных экспериментах (в разрядах постоянного тока и высокочастотных разрядах) для исследования данного явления.

Важно отметить, что пылевая плазма была впервые получена Ирвингом Лэнгмюром в 1920-х годах [62] в лабораторных экспериментах. Однако она привлекла значительное внимание научного сообщества лишь в 1980-х годах. Свойства пылевой плазмы начали активно изучаться в период развития технологий плазменного напыления, производства интегральных микросхем, создания тонких пленок и нанотехнологий. Присутствие заряженных микрочастиц, попадающих в плазму вследствие разрушения электродов и элементов разрядной камеры, вызывало загрязнение поверхности интегральных микросхем, непредсказуемые изменения параметров плазмы и повреждения стенок токамаков, и другие негативные явления. Таким образом, изначально физика пылевой плазмы имела прикладную направленность и стремилась оценить и научиться контролировать указанные проблемы.

Рассмотрим образование пылевой фракции в плазме разрядов постоянного тока. Она формируется в результате нескольких взаимодействующих процессов.

Под воздействием электрического поля, создаваемого между электродами в разрядной камере, газ ионизируется. В результате ионизации образуются электроны и положительные ионы газа. Электроны и положительные ионы двигаются вдоль линий электрического поля разряда. Электроны обладают

большей подвижностью и могут перемещаться на большие расстояния, в то время как положительные ионы имеют более низкую подвижность и обычно остаются ближе к электродам. Вблизи электродов создается электростатическое поле, которое оказывает притяжение на заряженные частицы. Пылевые частицы, находящиеся вблизи электродов или формирующиеся в результате диссоциации и конденсации газовых молекул, могут быть притянуты к электродам под действием электрической силы.

В плазме имеются и другие частицы газа, которые могут взаимодействовать с пылевыми частицами. Например, электроны могут столкнуться с пылевыми частицами и передать им свою энергию. В результате этого пылевые частицы получают достаточную энергию для перемещения в плазме и поддержания своего движения.

Зарядка пылевых частиц в плазме происходит через взаимодействие с заряженными частицами (электронами и ионами) и применением принципов электростатики. Заряд пылевой частицы может быть описан следующей формулой:

$Z = n_{e,i} \times e$, где: Z - заряд пылевой частицы, n - концентрация электронов или ионов, передавших свой заряд на пылевую частицу, e - элементарный заряд, примерно равный $1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Электрический заряд пылевых частиц, которые составляют пылевую фракцию, как правило принадлежит диапазону $Z \sim 10e - 10^4e$.

Зарядка пылевой частицы может происходить следующими способами:

Ионные удары: Пылевая частица может сталкиваться с положительными или отрицательными ионами в плазме. При таких столкновениях происходит перенос заряда с иона на пылевую частицу или наоборот. $Z = \alpha \times Q_i \times e$, где: α - коэффициент переноса заряда, Q_i - заряд иона.

Взаимодействие с электронами: Электроны в плазме могут облучать пылевую частицу, передавая ей свой заряд. $Z = \beta \times n_e$, где: β - коэффициент переноса заряда электронами, n_e - концентрация электронов в плазме.

В обоих случаях коэффициенты переноса заряда (α и β) зависят от ряда факторов, таких как масса и скорость частиц, энергия столкновения, концентрация частиц и свойства пылевой частицы (например, размер и состав). В разрядах электронная температура выше ионной, а концентрации электронов и ионов примерно одинаковы. В результате этого начальный электронный ток превышает ионный ток. При этом микрочастицы, находящиеся в плазме, начинают накапливать отрицательный заряд. Заряд частиц приводит к отталкиванию электронов и притяжению ионов, что в свою очередь уменьшает электронный ток и увеличивает ионный ток. В итоге устанавливается равновесный заряд, при котором электронный и ионный токи становятся равными. Этот процесс происходит быстро, обычно за несколько микросекунд. Стоит отметить, что аналогичный механизм отвечает за зарядку стенок разрядных камер, электрических зондов и других объектов в плазме.

Обычно ионы и электроны, сталкивающиеся с поверхностью пылевых частиц, рекомбинируют, что приводит к возвращению нейтральных молекул обратно в область разряда. В некоторых случаях поток ионов и электронов способствует увеличению массы частиц, тогда как в других случаях ионный поток вызывает испарение материала с поверхности частиц, что приводит к их уменьшению массы. Стоит отметить, что во всех рассмотренных случаях сохраняется квазинейтральность плазмы. В дальнейшем будем рассматривать только пылевую плазму с отрицательно заряженными частицами. В этом случае, как следует из условия квазинейтральности, $n_i > n_e$. При этом в некоторых случаях $n_i \sim n_e$, а в некоторых $n_i \gg n_e$.

Таким образом, пылевые частицы в плазме тлеющего разряда постоянного тока могут быть привлечены ионизированным газом и подвержены воздействию электрического поля и столкновениям с другими частицами, что позволяет им находиться и перемещаться в области ионизированного вещества.

На данное время исследование активного броуновского движения в коллоидной плазме является активной областью исследований в физике мягкой

материи. Активные частицы в коллоидной плазме способны самостоятельно генерировать энергию и двигаться, что приводит к интересным прикладным аспектам исследований.

Для исследования свойств коллоидной плазмы в земных лабораториях используют газовые разряды, которые происходят при давлениях инертного газа от 1 до 103 Па [63]. В плазме образуются ионы и электроны в концентрациях порядка 10^8 - 10^{10} см⁻³, при этом температура электронов T_e выше температуры ионов T_i и колеблется в диапазоне от 1 до 7 эВ, в то время как температура ионов T_i составляет 0.025 – 0.03 эВ. Линейные размеры пылевых частиц, вводимых в плазму, находятся в диапазоне от нескольких сотен нанометров (нанокластеры вещества) до нескольких десятков микрометров (полимерные макрочастицы или стеклянные микросферы). Благодаря высокой подвижности электронов в плазме пылевые частицы заряжаются отрицательно и могут иметь заряды в диапазоне от 10^3 – $10^5 e$. Заряженные частицы в плазме сильно взаимодействуют друг с другом, что может привести к образованию стабильных пылевых структур жидкостного или кристаллического типа, где могут происходить структурные переходы. Таким образом, коллоидная плазма представляет уникальную возможность изучать различные явления на кинетическом уровне, включая процессы самоорганизации и эволюции.

Изучение свойств коллоидной плазмы – это активно развивающаяся область науки, объединяющая физику плазмы, астрофизику, механику жидкостей, материаловедение, теории открытых систем и активных частиц. Это подтверждается множеством экспериментальных и теоретических исследований. Захват частиц в пылевой компоненте плазмы, вызванный их зарядкой в неоднородном электрическом поле, создает удобную среду для изучения различных физических процессов, таких как самоорганизация в разных типах систем и волновые процессы. Коллоидная плазма представляет собой открытую, диссипативную систему, которая может существовать в виде жидкости или кристалла и образовывать анизотропные трехмерные структуры, в том числе

квазиодномерные и квазидвумерные. В этой области наблюдаются различные типы структур, включая кристаллические и жидкостные, и возможны структурные переходы, такие как плавление, вызванные различными воздействиями, например, изменением параметров газового разряда.

Изучение процессов, связанных с переходом «кристалл-жидкость» в плазменно-пылевых структурах, является актуальной задачей, которая позволяет исследовать эволюцию и самоорганизацию сильно неидеальных систем. Один из способов вызвать плавление плазменного кристалла - это равномерное увеличение кинетической энергии частиц в плазменно-пылевой системе при воздействии лазерного излучения, приводящее только к изменению кинетической температуры частиц при постоянных параметрах окружающей среды. Этот процесс можно объяснить эффектом фотофореза, который возникает при нагреве пылевых частиц лазерным излучением и вызывает рост передаваемого импульса молекулами буферного газа. Фотофоретическая сила, действующая на пылевые частицы, приводит к увеличению их случайного движения в плазменно-пылевой структуре. Этот эффект наблюдался при формировании плазменного кристалла из металлических частиц в работах [64,65].

Исследования в области активных броуновских частиц имеют фундаментальную значимость, так как они способствуют развитию физики термодинамически открытых систем, а также установлению принципов самоорганизации и самосборки. Эти исследования имеют широкий потенциал применения, включая разработку новых материалов с параметрами, которые недостижимы для пассивных компонентов [66], доставка лекарственных веществ и т.д. Стоит отметить, что проблема активных броуновских частиц тесно связана с такими областями, как физика диссипативных структур и физика хаоса.

Для лабораторного исследования коллоидной плазмы часто используются плазменные разряды. Несамостоятельные разряды требуют внешнего ионизатора, такого как другой самостоятельный разряд, ионизирующее излучение, лазерное

излучение и другие, в то время как самостоятельные разряды возникают благодаря собственному электрическому полю разряда. Плазменные разряды могут быть:

1. Постоянный, низкочастотный (тлеющий, барьерный и др.);
2. Высокочастотный или радиочастотный с частотой поля $f=10^6-10^8$ Гц (ВЧ разряд);
3. Сверхвысокочастотный или микроволновый с частотой $f=10^9-10^{11}$ Гц;
4. Оптический (от далекого инфракрасного до ультрафиолетового);

Данная работа посвящена исследованиям активного броуновского движения в тлеющем разряде постоянного тока, поэтому стоит рассмотреть вопрос о возможности использования такой активной среды для исследований в данной области. В первую очередь стоит отметить, что разрядная плазма, будучи открытой термодинамической системой, является комплексным явлением, в котором сочетаются диссипация и внешние источники энергии, такие как электрические поля, ионные и электронные токи. Важно отметить, что в тлеющих и высокочастотных разрядах плазма находится в неравновесном состоянии, что проявляется в ее неизотермичности, где температура электронов T_e значительно превышает температуру ионов T_i . Неизотермичность такой плазмы обусловлена значительной разницей в массах электронов и ионов ($m_i \approx m_n \gg m_e$, где m_i , m_n , m_e - массы ионов, нейтральных атомов и электронов соответственно), что приводит к недостаточной эффективности теплообмена между соответствующими плазменными компонентами. В такой системе электроны и ионы образуются вследствие ударной ионизации, однако они быстро рекомбинируют или поглощаются электродами (или стенками разрядной камеры), что приводит к их исчезновению. Для установления термодинамического равновесия требуется большое количество столкновений между различными компонентами плазмы, однако при низком давлении и наличии электродов или стенок разрядной камеры, это условие не может быть удовлетворено в слабоионизованной плазме. При этом, ионы и нейтральные атомы (молекулы) все же успевают термализоваться поскольку $m_i \approx m_n$.

Масса микронных пылевых частиц значительно превышает массу электронов и ионов, что делает невозможным достижение термодинамического равновесия в пылевой плазме. В связи с этим, понятие температуры для плазменно-пылевой фракции приобретает новое значение. Поскольку пылевые частицы являются макрообъектами, их температура может быть определена как средняя кинетическая энергия атомов и молекул, составляющих эти частицы. Эта температура зависит от электронных и ионных потоков, направленных на поверхность пылевых частиц, столкновений с атомами (молекулами) окружающего газа и поглощения электромагнитного излучения. Температура поверхности пылевых частиц оказывает влияние на такие процессы, как термоэлектронная эмиссия, испарение и конденсация вещества пыли, и другие. Кроме того, пылевые частицы непрерывно движутся внутри плазменно-пылевых структур. Для большого ансамбля таких пылевых частиц возможно вычислить среднюю кинетическую энергию, которая может быть формально связана с температурой с точки зрения кинетической теории. Эту температуру принято называть кинетической температурой пылевой фракции. Кинетическая температура пылевой фракции может быть контролируема как внутренними факторами (например, пыле-акустическими неустойчивостями и процессами образования вихрей), так и внешними воздействиями (например, лазерным излучением, магнитным полем и другими воздействиями). Ясно, что понятия температуры поверхности и кинетической температуры имеют различный физический смысл. В дальнейшем, под температурой пылевой фракции T_d мы будем понимать кинетическую температуру. Из-за принципиальных различий в механизмах нагрева электронов, ионов и пыли, кинетическая температура пылевой фракции может значительно отличаться от электронной и ионной температур. В работах [67] и [68] описываются эксперименты, в которых кинетическая температура пылевой компоненты превышала 106 К (100 эВ), что на порядок превышало температуру электронов. В данном случае соотношение между температурами плазменных фракций может быть описано двойным неравенством: $T_i \ll T_e \ll T_d$. В работе [69], наоборот, рассмотрен противоположный случай, где кинетическая температура пылевой фракции T_d составляла около 400 К (0,037 эВ).

При таких низких значениях кинетической температуры в плазменно-пылевой структуре наблюдается упорядоченное и практически стационарное взаимное расположение отдельных частиц. В 1994 году в институте внеземной физики имени М. Планка (Гархинг, Германия) [70] было впервые наблюденo такое состояние пылевой плазмы, получившее название плазменно-пылевого кристалла. С тех пор свойства таких кристаллов были хорошо исследованы, и был обнаружен и объяснен эффект анизотропии кристаллов [71-74] и другие.

При увеличении кинетической температуры в плазменно-пылевой фракции возникают фазовые переходы, что позволяет пылевой компоненте демонстрировать свойства трех агрегатных состояний: кристалла, жидкости и газа. Помимо кинетической температуры, важным параметром, определяющим агрегатное состояние плазменно-пылевой структуры, является параметр неидеальности (Γ), который представляет собой отношение кинетической и потенциальной энергии пылевых частиц. Значения параметра Γ различаются для разных состояний: кристаллы соответствуют $\Gamma > 170$, жидкость – $1 < \Gamma < 100$, а газ – $\Gamma < 1$. При значениях $\Gamma \ll 1$ пылевую компоненту можно рассматривать как идеальный газ, и пылевую плазму можно считать идеальной. Тем не менее, в большинстве случаев разрядная пылевая плазма является сильно неидеальной [68].

Говоря о прикладных аспектах активного броуновского движения в тлеющем разряде постоянного тока стоит отметить, что они применимы для широкого спектра наук и задач.

Например, в одном из экспериментов [75], активные броуновские частицы были синтезированы путем введения катионного поверхностного слоя на наночастицах Fe_3O_4 , после чего они были помещены в тлеющий разряд постоянного тока в водном растворе. В результате эксперимента было обнаружено, что частицы проявляют активное броуновское движение, которое было связано с гидродинамическими эффектами, возникающими в результате взаимодействия частиц с ионами газа и электродами разряда.

В другом исследовании [76] было исследовано активное броуновское движение золотых наночастиц в тлеющем разряде постоянного тока в водном растворе (см. Рисунок 1.11). В этом эксперименте было обнаружено, что размеры и формы частиц оказывают значительное влияние на их активное броуновское движение, которое происходит в результате термофореза и электрофореза.

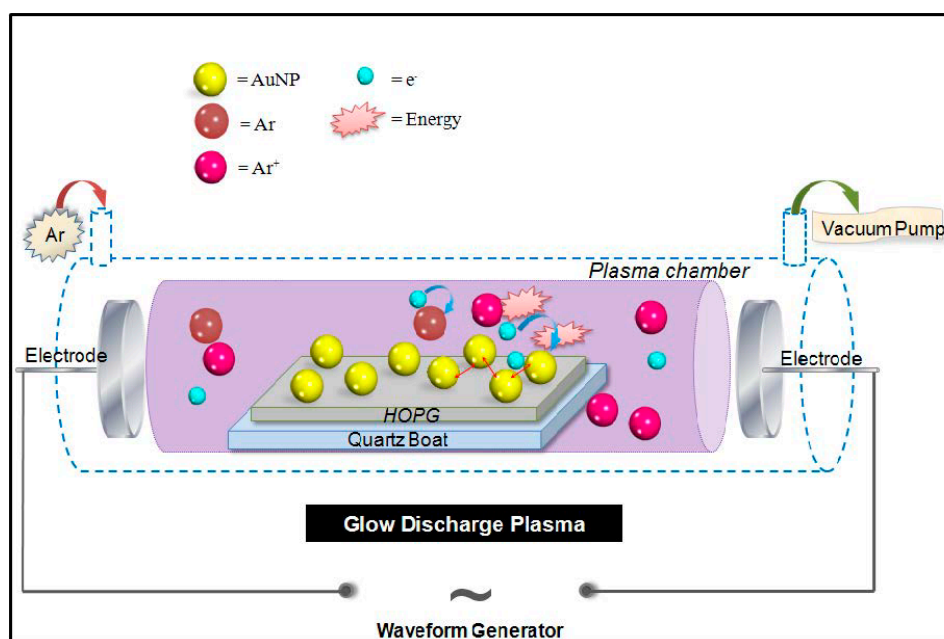


Рисунок 1.11 Схема, показывающая генератор «плазмы тлеющего разряда». Аргон (Ar, коричневый) при генерации высокого напряжения между двумя электродами уступит место образованию ионов аргона (Ar^+ , фиолетовый) и электронов (e^- , голубой). Наночастицы золота Au-NP (желтые) осаждаются поверх высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ), который помещается поверх кварцевой пластины.

Помимо этого, возможно применение в транспортировке и перемешивании материалов на микромасштабе. Активные частицы могут использоваться для перемешивания реагентов в микрохимических процессах или для доставки микрочастиц и лекарственных препаратов в биомедицинских приложениях. Исследования показывают, что активные броуновские частицы могут усиливать перемешивание и диффузию в коллоидной среде, что может быть полезным в различных промышленных и биологических процессах.

Также активное броуновское движение в коллоидной плазме может быть полезным в области материаловедения. Исследования активных частиц в плазме могут помочь в понимании и контроле структуры и свойств плазменных пленок, наночастиц и наноструктур, образующихся в плазме. Это может привести к разработке новых методов синтеза и модификации материалов с улучшенными свойствами, такими как оптические, электронные или механические свойства.

Помимо перечисленного применимо и в биологических науках, таких как микробиология и нейронауки. Например, в микробиологии активное броуновское движение может использоваться для изучения движения микроорганизмов в жидкости и определения их скорости и направления движения. Это может быть полезным для понимания различных процессов, связанных с микробиологической жизнью, таких как движение планктона в воде или движение микроорганизмов внутри клеток. В тлеющем разряде постоянного тока коллоидная плазма образуется в результате взаимодействия газа с электрическим полем. Электрическое поле ионизирует молекулы газа, что приводит к образованию электронов и положительных ионов. Заряженные частицы взаимодействуют с частицами пыли.

Исследования активного броуновского движения в тлеющем разряде постоянного тока проводятся для изучения физических свойств активных систем, а также для поиска новых материалов и технологий в области нанотехнологий и биомедицины.

В нейронауках активное броуновское движение может использоваться для изучения движения молекул внутри нервных клеток и связанных с этим процессов. Например, активное броуновское движение может помочь в определении диффузии нейромедиаторов внутри синаптической щели или движения белков внутри нервных волокон. Это может быть полезным для понимания механизмов, лежащих в основе нервной системы и для разработки новых методов лечения нервных заболеваний.

Таким образом рассмотрим несколько преимуществ и особенностей использования тлеющего разряда постоянного тока для исследования активного броуновского движения.

Во-первых, тлеющий разряд обеспечивает стабильное электрическое поле, что позволяет контролировать движение частиц внутри плазмы. Электрическое поле может влиять на заряд и траекторию движения частиц, что открывает возможности для управления активным броуновским движением и манипуляции частицами в плазме.

Во-вторых, в такой разряд обладает относительно низкой температурой и высокой плотностью, что способствует сохранению структуры и стабильности активной среды. Это позволяет длительное время наблюдать активное броуновское движение частиц в плазме без значительных изменений условий.

Третьим преимуществом тлеющего разряда постоянного тока является его низкое давление, что делает его удобным для исследований в микроскопической среде. Это позволяет изучать активное броуновское движение на малых масштабах, например, внутри микроканалов или среди наночастиц.

Таким образом, исследования активного броуновского движения в тлеющем разряде постоянного тока имеют широкий спектр приложений в различных областях науки и технологий, и поэтому они являются активной областью исследований в настоящее время.

Все важнейшие результаты данной работы получены в экспериментах, проведенных в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Детальное описание экспериментальной установки представлены в следующей главе.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОЛЛОИДНОЙ ПЛАЗМЫ

2.1 Экспериментальный стенд для изучения коллоидной плазмы тлеющего разряда постоянного тока

В данной главе мы рассмотрим специально модернизированный экспериментальный стенд и комплекс для трехмерной диагностики для исследований коллоидной плазмы в тлеющем разряде постоянного тока (см. рисунок 2.1). 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.

Экспериментальный стенд для изучения коллоидной плазмы в тлеющем разряде постоянного тока состоит из трех частей: вакуумной системы, электрической части и диагностического комплекса.

В свою очередь, основными частями вакуумной системы являются стеклянная трубка(камера), вакуумный пост и системы газонапуска и контроля давления. Рассмотрим каждую составляющую отдельно.

Вертикально ориентированная газоразрядная трубка длиной $l = 1250$ мм и внутренним диаметром $d = 40$ мм. Нижний конец трубки был закрыт, а верхняя часть трубки была подключена к системе контроля давления (см. рисунок 2.2).

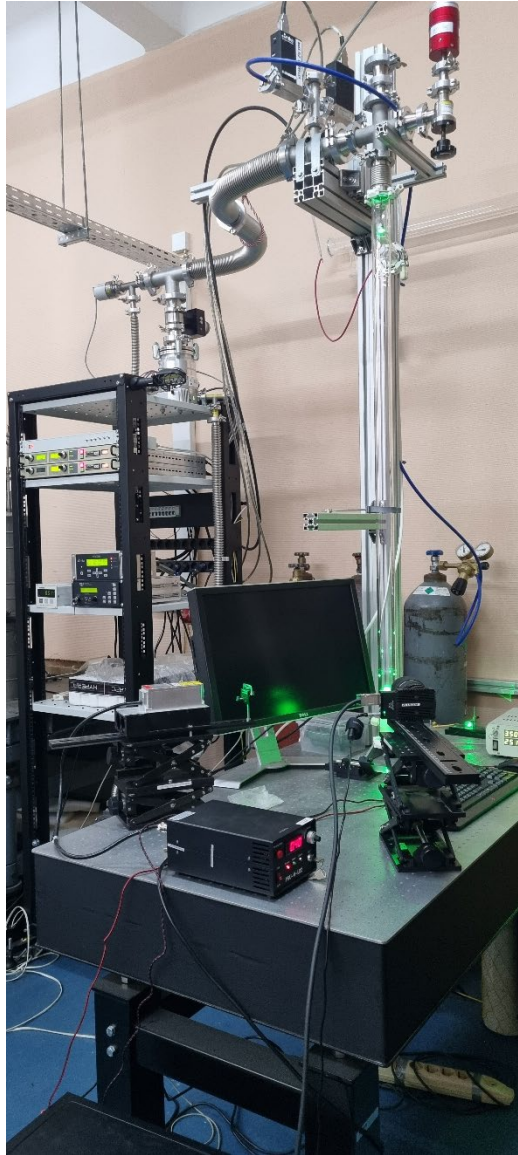


Рисунок 2.1 Фотографии экспериментального стенда и диагностического комплекса тлеющего разряда постоянного тока.

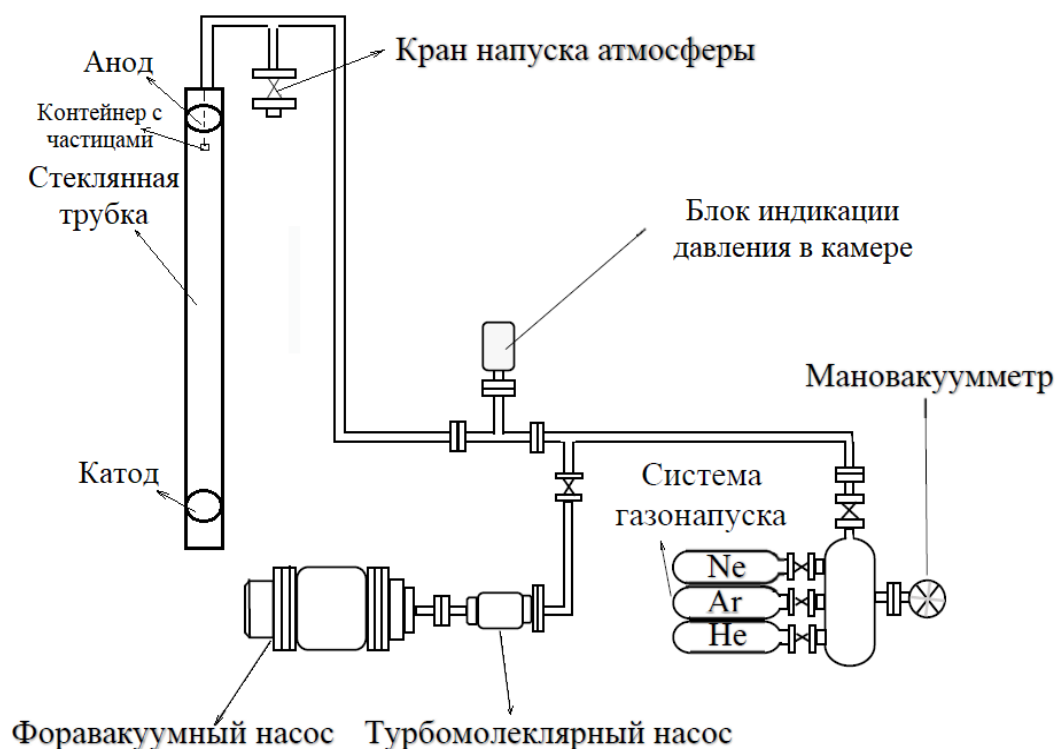


Рисунок 2.2 Схема вакуумной системы экспериментального стенда тлеющего разряда постоянного тока.

Вакуумный пост связан с системой через клапан, позволяющий регулировать скорость откачки газа из рабочей камеры, и состоит из турбомолекулярного и форвакуумного насоса. Изначально осуществляется пуск форвакуумного насоса, который находится на «подушке», чтобы избавиться от примесей масла. Когда система достигает давления 133 Па (условие являющееся необходимым для запуска турбомолекулярного насоса), производится запуск турбомолекулярного насоса, который, в свою очередь, позволяет достигать сверхнизких давлений $\sim 10^{-7}$ Па. После удаления газовой атмосферы из трубки с помощью системы газонапуска и контроля давления подается буферный газ и в вакуумной системе устанавливается давление в диапазоне от 1 до 100 Па. В качестве рабочего газа, как правило, использовался инертный газ аргон.

Система контроля давления и газонапуска подключается к баллонам с инертным газом. Она включает в себя блок электронного управления, датчик давления, контроллер потока газа и клапан, который регулирует скорость откачки газа. Блок электронного управления управляет положением запорного клапана и контролирует поток рабочего газа с помощью контроллера. Для измерения давления газа в вакуумной системе до 10^{-8} Па с точностью до 0,05% используется емкостной манометр типа «Баратрон» в качестве датчика давления. Блок электронного управления регулирует положение запорного клапана на основе сигнала от датчика давления, что позволяет автоматически подстраивать скорость откачки газа из вакуумной системы для поддержания требуемого давления. Кроме того, в вакуумный трубопровод входит клапан напуска атмосферы, который необходим для наполнения рабочей камеры воздухом перед ее открытием.

Электрическая часть экспериментального стенда состоит из катода, расположенного в 150 мм ответвлении внизу трубки, и анода, расположенного в 150 мм ответвлении вверху трубки, расстояние между ними составляло 1050 мм.

Для зажигания и регулировки мощности разряда использовались два источника питания «Spellman» с максимальным возможным напряжением 3кВ, добавление второго источника было необходимо для решения проблемы расположения разряда, ранее разряд зажигался на блок напуска, а в результате добавления тока смещения разряд горит у катода.

В верхней части трубки располагался контейнер с пылевыми частицами при механическом воздействии на который происходит вброс пылевых частиц в область разряда. Частицы инжектируются в плазму путем передачи вибраций через дно цилиндрического контейнера с сеткой.

2.2. Методики для двумерной и трехмерной диагностики в коллоидной плазме

Диагностический комплекс экспериментального стенда состоит из газоразрядного аргонового или твердотельного лазера, устройства увеличения диаметра пучка, системы из двух камер высокоскоростной съемки и персонального компьютера для видеозаписи проходящих процессов и последующей обработки полученных данных при помощи пакета специально разработанных программ (рисунок 2.3).

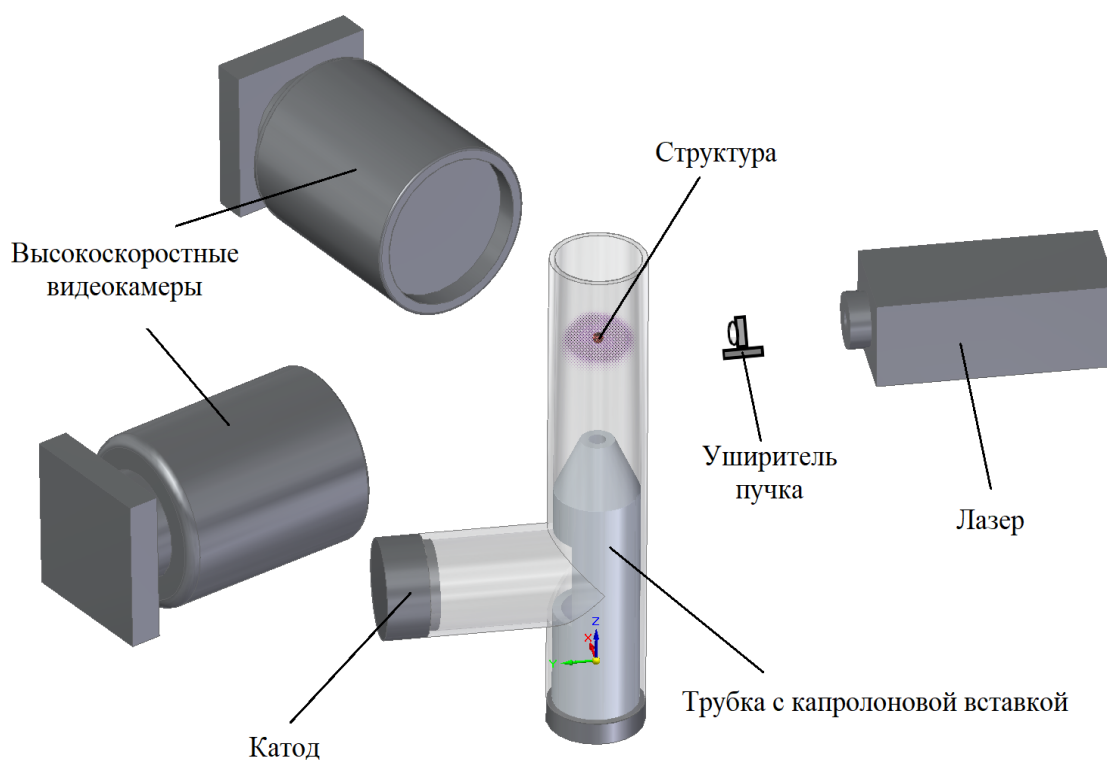


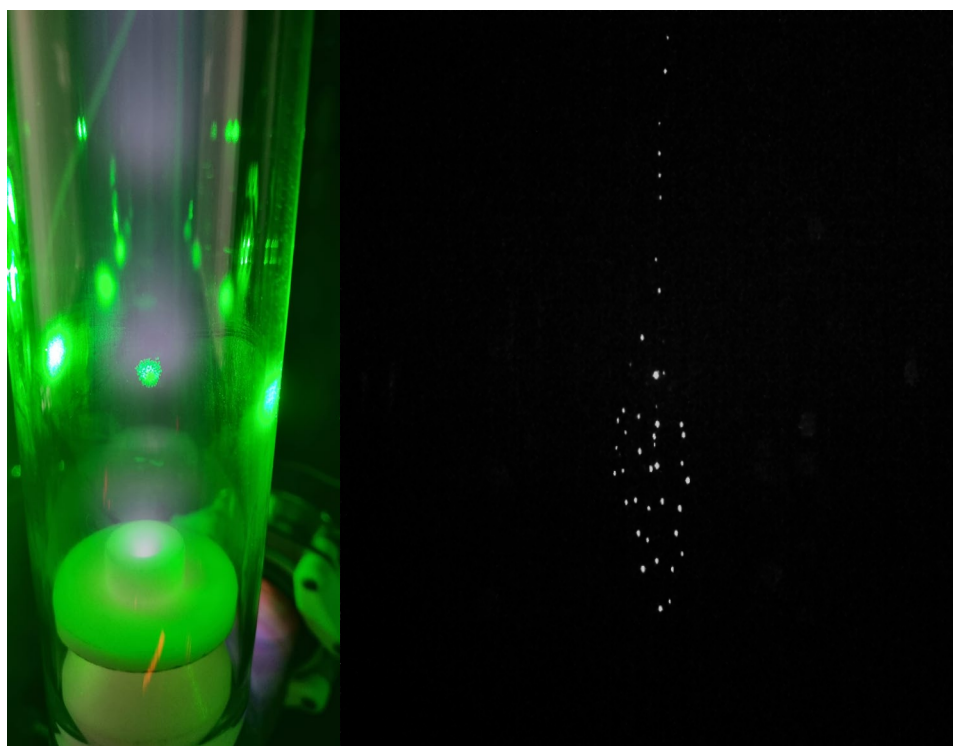
Рисунок 2.3 Схема диагностического комплекса экспериментального стенда тлеющего разряда постоянного тока.

Видеорегистрация микрочастиц при помощи двух синхронизированных камер допускает получение различных видеоизображений в один момент времени, например, движение микрочастиц в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока.

Высокоскоростные видеокамеры позволяют осуществлять запись положений частиц в горизонтальной и вертикальной плоскостях с частотой съемки до 1000 кадров в секунду с размерами кадра 1440 на 1440 пикселей. Камеры располагались под углом 90 градусов. Место было выбрано таким, чтобы линзы находились на одной высоте. При этом оси объективно располагались перпендикулярно оси газоразрядной трубки трубки. Лазерный луч не попадал в объективы видеокамер и не мешал процессу регистрации.

Часто используется метод исследования, который включает в себя внесение регулируемого внешнего воздействия на объект и дальнейшее наблюдение за изменениями в его состоянии. В экспериментах для изменения порядка и динамики пылевых частиц в структурах часто применяют лазерное излучение в качестве внешнего воздействия. Поэтому для подсветки и воздействия на плазменно-пылевую структуру в экспериментах мы использовали лазерное излучение от двух типов лазера в зависимости от требований эксперимента, твердотельный полупроводниковый лазер с длиной волны 532 нм или аргоновый газоразрядный с основной длиной волны 488 нм.

Для наглядности на рисунке 2.4 представлены фотографии структур пылевых частиц, подсвеченная лазерным излучением. Таким образом используя высокоскоростные видеокамеры и объективы с достаточной глубиной фокусного расстояния мы можем наблюдать структуры более подробно (рисунок 2.4 б).



а)

б)

Рисунок 2.4 Фотографии структур из пылевых частиц, подсвеченных лазерными излучением находящихся в нижней страте тлеющего разряда постоянного тока. (а) – взвесь частиц, кадр с фотоаппарата, (б) – кадр видеоизображения цепочечной структуры из частиц размером 5мкм. с высокоскоростной камеры с объективом.

В большинстве серий экспериментов использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 532 нм. Было необходимо выяснить, ширину пучка такого лазера, чтобы понимать какой подобрать уширитель пучка, который бы обеспечивал полное покрытие структуры лазерным пучком. Для этого были проведены дополнительные исследования распределений проекций сечений пучка при различной мощности лазера (рисунки 2.5). Также построена проекция в 3D для мощности 1.1 Вт для более наглядного понимания сечения, является ли оно однородным.

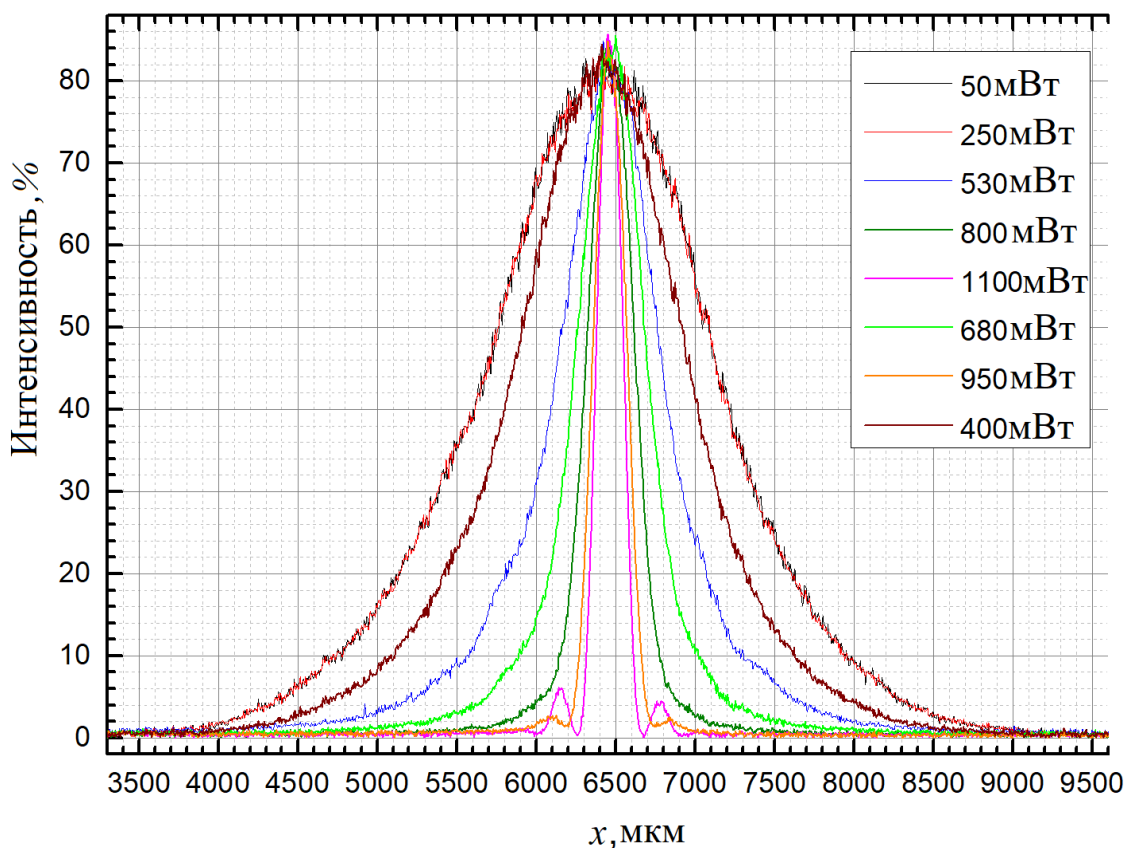


Рисунок 2.5 Проекция сечения пучка твердотельного лазера при различной выходной мощности.

Таким образом можно наблюдать как сжимается пучок лазера при увеличении мощности лазерного излучения. По шкале x можно оценить полуширину профиля, l , на полувысоте. Тогда интенсивность лазерного излучения равна (для центрального пятна): $I_p = W_{las} / (2 * \pi * l^2)$.

Следовательно, имея выше сказанное мы подбирали уширитель пучка в зависимости от размеров исследуемого объекта таким образом, чтобы плотность мощности воздействия была равномерно распределена на всю структуру, и чтобы структура не покидала лазерный луч.

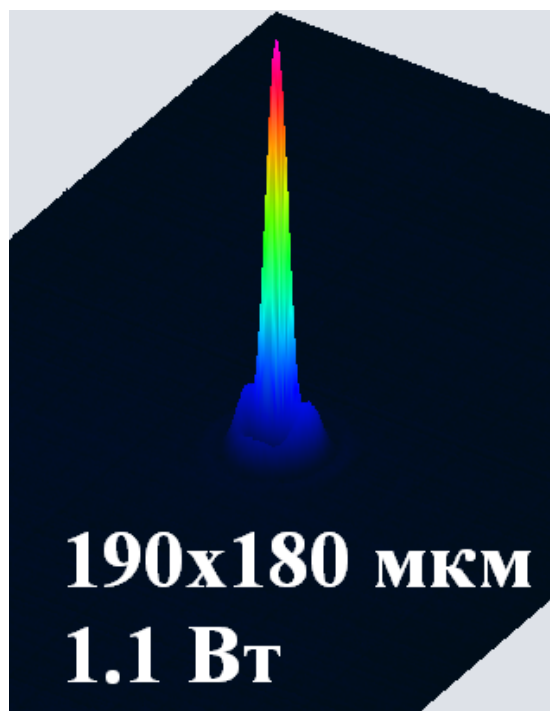


Рисунок 2.6 3D проекция сечения пучка твердотельного лазера при мощности 1.1 Вт.

С помощью лазерного воздействия экспериментально наблюдались различные эффекты, например, явления самоорганизации в криогенной газоразрядной плазме [1-3], а также активное броуновское движение в тлеющем разряде постоянного тока [4], [5]. В наших экспериментах применяются лазеры с минимальным разбросом выходной мощности лазерного излучения, чтобы достичь точного и контролируемого лазерного воздействия.

Для сопоставления двухмерной и трехмерной методик диагностики была проведена серия экспериментов с одиночной янус-частицей в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения и для анализа построены среднеквадратичные смещения (рисунок 2.7) соответствующие данным полученным с каждой камеры отдельно (двухмерный случай) и одновременно (трехмерный случай).

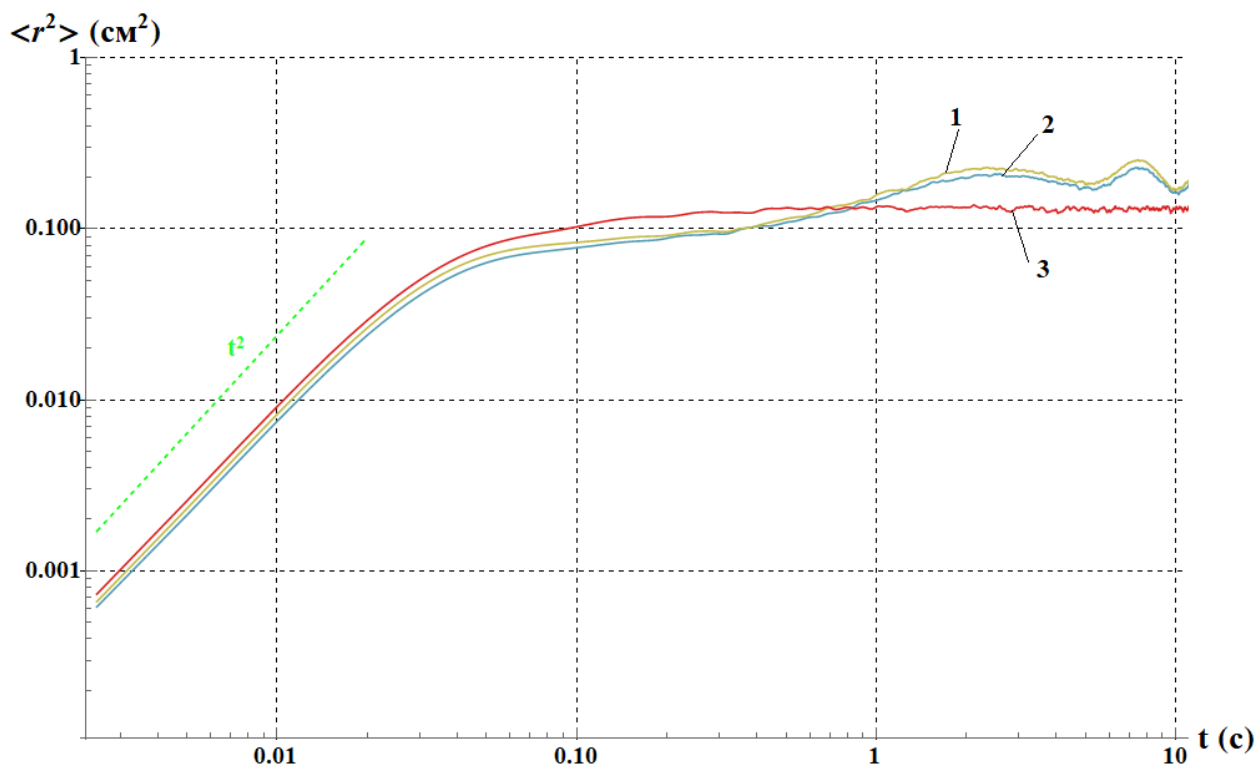


Рисунок 2.7 Среднеквадратичное смещение частиц под воздействием лазера мощностью 900 мВт (плотностью мощности 1.15 Вт/см²): кривая 1 (желтая) - для первой камеры; кривая 2 (синяя) - для второй камеры; кривая 3 (красная) - трехмерный случай.

Можно наблюдать, что для качественной оценки среднеквадратичных смещений можно использовать методики анализа, как и для двухмерного случая (с одной видеокамерой), так и для трехмерного (используя две видеокамеры), а количественная разница отличается в зависимости от участка кривой, для промежутка до $t \sim 0.1$ с погрешность составляет не более 5%, для дальнейшего временного промежутка не более 10%.

Так же были проведены дополнительные оценки и качественный анализ основных параметров плазмы и динамики янус-частиц

Сила тяжести, действующая на пылевую микрочастицу из меламин-формальдегида (МФ) диаметром 5 мкм и массой $M = 0.99 \times 10^{-12}$ г, равна $F_g = Mg = 0.97$ пН. В условиях левитации сила тяжести является нижней оценкой для сил, действующих на частицу. Одностороннее давление на нее при 10 Па равно

$F_g=196$ пН. Поэтому уже 2% неоднородность температуры поверхности микрочастицы будет порождать радиометрическую силу, сравнимую с гравитационной.

Рассмотрим энергетический баланс для микрочастицы. Удельная теплоемкость МФ равна 1200 Дж/кг К, соответственно, тепловая энергия частицы при 300К равна 2.56 мкДж. В предположении полного поглощения излучения лазерного излучения с интенсивностью 1 Вт/см², поглощаемая мощность равна 0.39 мкВт. Соответственно, при отсутствии потерь энергии, под воздействием лазерного излучения за время $\Delta t = 26$ с частица достигла бы температуры плавления 1190К. Мощность излучения черного тела с поверхности частицы при такой температуре составляет 9.2 мкВт. Баланс между поглощенной энергией лазера и излученной в приближении полного поглощения и излучения черного тела наступает при температуре 545К.

Падающий на пылевую частицу электрон приносит энергию $2T_e$, поток ионов на микрочастицы в основном обусловлен столкновениями связанных ионов с атомами с резонансной передачей заряда [30]. В таком приближении средняя кинетическая энергия падающих на частицу ионов равна поверхностному потенциалу частицы, который по порядку величины равен утроенной температуре электронов. Попавший на поверхность частицы ион рекомбинирует, и при этом выделяется энергия равная потенциалу ионизации 15.8 эВ. Положим для оценки температуру электронов $T_e=7$ эВ, тогда при каждом столкновении иона с микрочастицей будет выделяться энергия равна $\Delta\varepsilon_{rec} = 5T_e + I \approx 50$ эВ.

Для определения потока ионов на пылевую частицу необходимо знание параметров разряда. При напряжении 2000 В трубке длиной 120 см с аргоном при давлении 10 Па приведенная напряженность среднего поля примерно равна 300Тд. Соответственно, скорости дрейфа ионов и электронов равны 0.9 и 140 км/с, эффективные температуры 0.12 и 7 эВ. Отсюда при токе разряда 1.25 мА и диаметре трубки 4 см получаем числовую плотность электронов 10^8 в см³. Довольно грубая оценка дает заряд пылевой частицы $10^4 e$, а мощность

энерговыведения на ее поверхности за счет рекомбинации на два-три порядка меньше мощности поглощаемого лазерного излучения.

Пылевая частица имеет также собственное вращение. Энергия вращения шара определяется его массой, радиусом и частотой вращения: $\varepsilon_{\omega} = \frac{1}{5}MR^2\omega^2$. В условиях равновесия с газом при температуре T_a функция распределения энергии собственного вращения является максвелловской со средним значением энергии, равным температуре газа: $\langle \varepsilon_{\omega} \rangle = \frac{3}{2}T_{\omega} = T_a = \frac{2}{3} \langle \varepsilon_a \rangle$ [21]. Соответственно, при температуре газа $T_a = 300\text{К}$ энергия поступательного движения атомов равна 0.039 эВ, а средняя энергия вращения будет равна 0.026 эВ с частотой 73 Гц и скоростью поверхности 0.12 мм/с. Если движение микрочастиц характеризуется температурой 1 или 100 эВ, то частота их вращения в условии равновесия поступательных и вращательных степеней свободы будет соответственно равна 454 и 4541 Гц, соответственно. В случае равенства поступательной и вращательной энергии шара радиуса R его частота вращения зависит только от скорости шара: $\omega = V/4R$.

Измерения функций распределения скоростей частицы показывают, что они хорошо описываются распределением Гаусса, но с сильно различающимися температурами для движения в горизонтальной плоскости и в вертикальном направлении (вдоль оси трубки). Этот факт указывает на сильно подавленный энергообмен между различными степенями свободы, обусловленный видимо различной жесткостью электростатической ловушки в продольном и горизонтальном направлениях, а также сильной анизотропией скоростей ионов.

2.3. Заключение и выводы по Главе 2

Произведено сопоставление методик двухмерной 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 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 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%.

Представлены результаты аналитических оценок энергобаланса для активных броуновских частиц, поглощающих лазерное излучение. Особое внимание уделено влиянию их собственного вращения на характер движения.

Структуры формировались и исследовались в нижней страте положительного столба тлеющего разряда постоянного тока. Стабилизация положения страты осуществлялась при использовании капралоновой вставки конусообразной формы. Комплекс для трехмерной диагностики в коллоидной плазме, включал в себя газоразрядный аргоновый или твердотельный лазеры, устройство увеличения диаметра пучка, системы из двух камер высокоскоростной съемки и персонального компьютера для видеозаписи проходящих процессов и последующей обработки полученных данных при помощи пакета специально разработанных программ.

ГЛАВА 3. АКТИВНОЕ БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ УЕДИНЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1 Движение уединенных микрочастиц в плазме при воздействии лазерного излучения различной мощности

В данном разделе представлены исследования активного броуновского движения одиночных микрочастиц в трехмерной конфигурации тлеющего разряда постоянного тока. А также сравнение динамики частиц с разными поверхностными свойствами, находящихся в одинаковой плазменной среде.

В эксперименте использовались следующие виды сферических пылевых частиц меламин-формальдегида (МФ) диаметром $D \approx 5$ мкм: пылевые частицы без поглощающего покрытия; МФ частицы в медной оболочке; частицы с частичным медным покрытием (янус-частицы). Фотоизображения пылевых частиц, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) представлены на рис. 3.1.

Отметим, что в нашем случае пылевые частицы вдвое меньше по сравнению с экспериментами в ВЧ разряде [1,2]. Это связано с электростатической конфигурацией разряда постоянного тока, не допускающей левитации тяжелых пылевых частиц в гравитационных условиях. Пылевые частицы без покрытия и с медным покрытием были изготовлены компанией MicroParticles GmbH (Берлин, Германия), а янус-частицы были изготовлены в нашей лаборатории по технологии, описанной ниже.

3.2 Экспериментальные данные

Говоря об экспериментах с уединёнными частицами в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения важным аспектом являются сами исследуемые частицы, ниже описан метод изготовления янус-частиц.

В основе процесса лежала модификация поверхности микрочастиц под действием потоков ионов в разрядной плазме. Изготовление осуществлялось внутри емкостной ВЧ-разрядной камеры по методике, описанной в [3]. Сферические пылевые частицы МФ без покрытия ($D \approx 5$ мкм) помещались на нижний электрод, где удерживались силой тяжести. Поверхностная плотность частиц у нижнего электрода составляла около 2000 см^{-2} . После этого разрядную камеру откачивали (до остаточного давления $p_{Air} < 10^{-2}$ Па) и заполняли инертным буферным газом (аргоном) до рабочего давления $p_{Ar} = 5$ Па. В процессе модификации разрядную камеру непрерывно откачивали турбомолекулярным насосом, давление поддерживали непрерывной подачей рабочего газа со скоростью 2 стандартных $\text{см}^3/\text{мин}$. Таким образом, плазма разряда сохраняла свои свойства неизменными на протяжении всего процесса изготовления янус-частиц. Для зажигания ВЧ-разряда на электроды подавалось переменное напряжение от высокочастотного генератора с частотой 13,56 МГц. Плазма генерировалась при мощности $W_{load} = 15$ Вт, а отраженная мощность составляла $W_{ref} = 4$ Вт. За время существования разряда с рассматриваемыми параметрами наблюдалось распыление медных электродов, что приводило к появлению ионов меди в объеме плазмы. В приэлектродном слое (плазменной оболочке) ионы плазмы разгонялись до сверхзвуковых скоростей $v_i > C_s$ (C_s – ионно-звуковая скорость) и бомбардировали поверхность обрабатываемых микрочастиц. Важно отметить, что ионы меди образовывали на поверхности микрочастиц тонкое медное покрытие, а ионы аргона разъедали их поверхность. Рассматриваемые процессы происходили в области верхней полусферы микрочастиц (обращенной к разряду), что связано с выполнением условия $v_i > C_s$. В результате поверхность микрочастиц была изменена только с одной стороны. При этом поверхность микрочастиц с противоположной стороны сохранила свои первоначальные свойства. Таким образом, изначально однородные пылевые частицы приобрели свойства пылевых янус-частиц. Экспериментально определено оптимальное время воздействия на микрочастицы, которое для рассмотренных параметров разряда составило примерно 5 часов. При меньших экспозициях медное покрытие фрагментировалось, а при более

длительных экспозициях наблюдалась сильная эрозия облучаемой полусферы. Появление меди на поверхности модифицированных частиц МФ подтверждено рентгеноспектральным анализом. Массовая доля меди составляла несколько процентов. Кроме того, модификация поверхности была подтверждена анализом изображения с помощью электронной микроскопии (СЭМ).

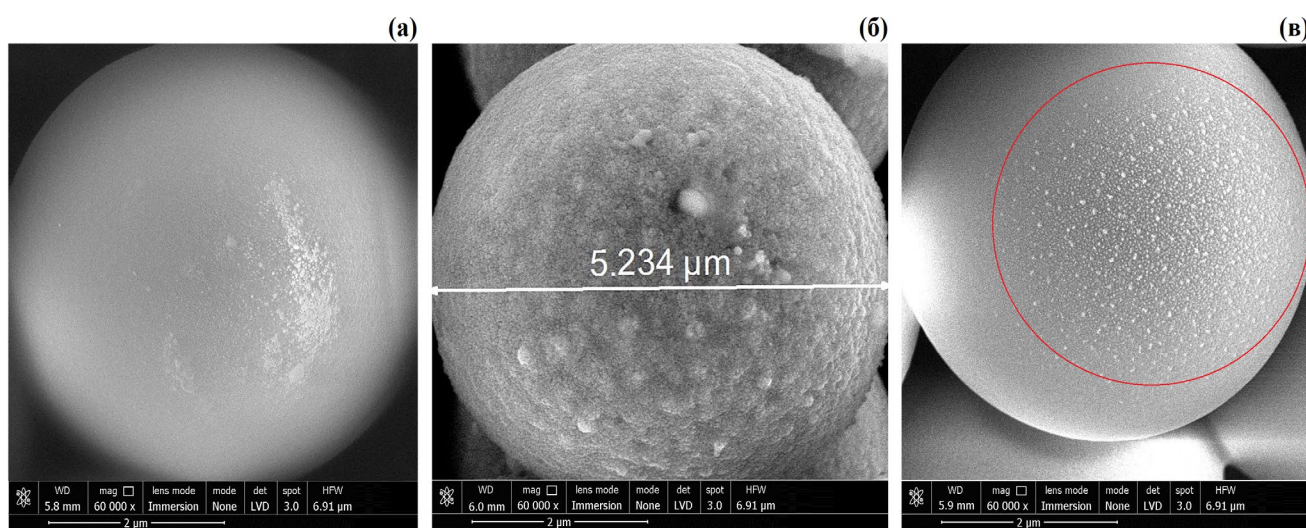


Рисунок 3.1 СЭМ изображения сферических монодисперсных частиц меламино-формальдегида (МФ) диаметром 5 мкм: (а) без поглощающего покрытия; (б) частица в медной оболочке; (в) с частичным медным покрытием – янус-частица.

3.3. Анализ экспериментальных данных

Эксперимент проведён на установке с использованием комплекса трехмерной диагностики в тлеющем разряде постоянного тока, описанной в главе 2. Давление в трубке составляло 10 Па и поддерживалось непрерывной подачей рабочего газа со скоростью 4 стандартных см³/мин. Напряжение и ток разряда составляли $V = 2.0$ кВ, $I = 1.25$ мА, соответственно.

Для трехмерного анализа использовалась методика записи двумя синхронизированными видеокамерами. Объективы камер располагались под углом 90°. Полученные изображения обрабатывались на компьютере с помощью

специального программного обеспечения для получения трехмерных динамических характеристик исследуемых пылевых частиц.

Динамика одиночных пылевых частиц в тлеющем разряде определяется рядом сил, главными из которых являются: сила гравитации, F_g ; электрическая сила со стороны постоянного поля разряда, F_E ; силы ионного и нейтрального увлечения F_{id} , F_{nd} ; фотофоретические силы F_f [4]. Причем состояние равновесия обеспечивают, как правило, первые три силы F_g , F_E , F_{id} . Исследуемые, в нашем эксперименте частицы имели примерно одинаковую массу и размеры (по нашим оценкам разница в массах пылевых частиц составляет $\sim 35\%$, что обусловлено массой тонкой медной оболочки). Следовательно, при одинаковых параметрах разряда мы имеем $F_{g1} \approx F_{g2} \approx F_{g3}$ и $F_{id1} \approx F_{id2} \approx F_{id3}$, где индексы "1", "2", "3" обозначают разные типы используемых частиц. Электрическая сила определяется зарядом пылевых частиц. Для изолированных частиц можно использовать простое приближение ограниченного орбитального движения (OML). Согласно известным моделям [5], величина заряда частицы, погруженных в газовый разряд, зависит от площади поверхности. Следовательно, заряд частиц можно считать одинаковым, тогда $F_{E1} \approx F_{E2} \approx F_{E3}$. Таким образом, динамика все трех типов частиц в состоянии равновесия (в отсутствии лазерного излучения) будет примерно одинаковой. В таком случае, нет необходимости точно измерить указанные силы, а достаточно обеспечить одинаковые условия разряда для всех типов используемых частиц.

Рассмотрим теперь силы, определяющие их активное движение. В работе [1] показано, что механизмы активности, выводящие двухмерную систему плазма-пылинка из состояния равновесия при воздействии лазерного излучения основаны на следующих явлениях:

1. Фотофорез за счет температурного градиента на поверхности частиц, представляющего собой асимметричную нейтральную силу сопротивления, вызванную разницей температур (для всех частиц);

2. Фотофорез за счет разных коэффициентов аккомодации, представляющий собой нейтральную силу сопротивления, обусловленную разными коэффициентами аккомодации МП и железа (для янус-частиц).

Фотофоретическая сила — это сила, которая связана со световым излучением. Градиенты температуры, наряду с вращением частицы вокруг оси, могут создавать силы, вызывающие ее активное движение [6]. Очевидно, что действие фотофоретической силы будет существенно разным для частиц с разным типом поверхности. Янус-частица, освещенная сильным лазерным излучением, может иметь наиболее сильные температурные градиенты на поверхности за счет ее неоднородности. Это приводит к сильному фотофоретическому движению, которым можно управлять изменением интенсивности лазерного излучения, I_L , которая пропорциональна мощности лазера $P_L \sim I_L$. Однако, для частиц с однородной поверхностью фотофорез также является фактором активности.

Действие лазерного излучения на частицу может привести к появлению радиометрической силы, связанной с неоднородным поглощением поверхности и, как следствие, неравномерному нагреву и 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

Для исследования активного движения частиц с разным типом поверхности в трехмерной конфигурации одиночная микрочастица инжестировалась в

стратифицированный тлеющий разряд постоянного тока, где в результате баланса сил F_g , F_E и F_{id} наблюдалась ее левитация. Для возбуждения активного движения левитирующие частицы облучались лазерным излучением различной интенсивности. 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.

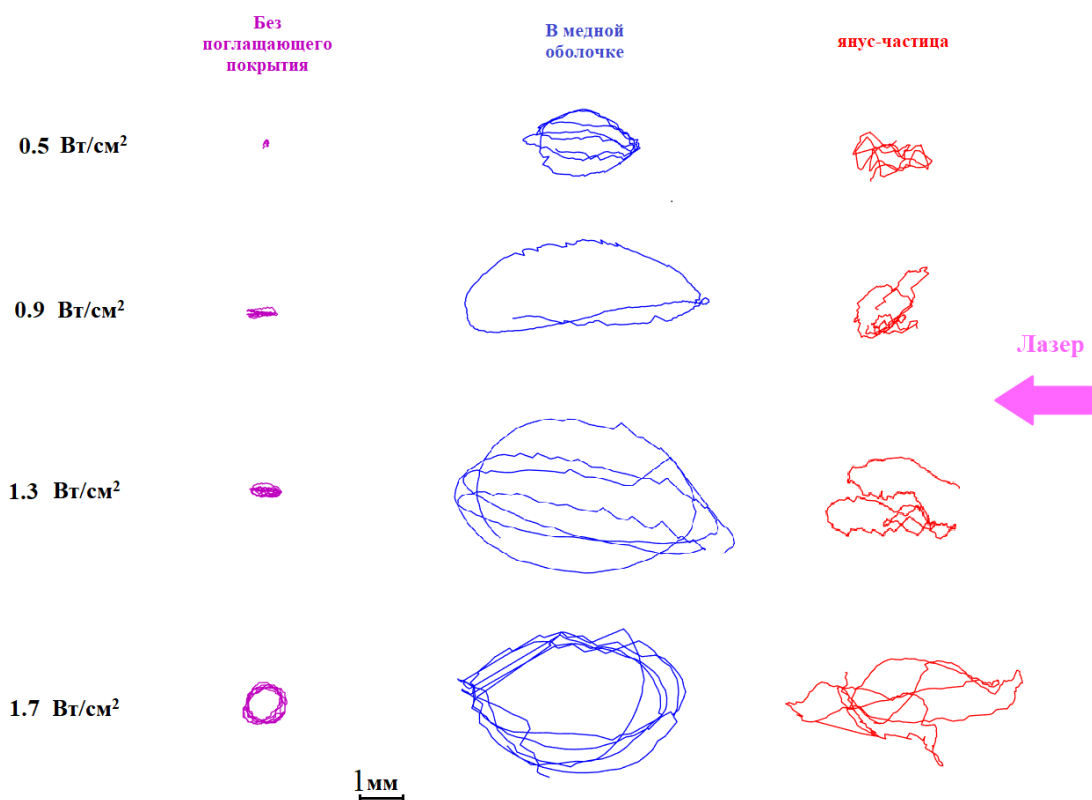


Рисунок 3.2 Вид сверху (горизонтальная составляющая активного броуновского движения). Траектории пылевых частиц в слое разряда постоянного тока за время $\Delta t=1$ с при различных мощностях лазера. Левый ряд — частица без поглощающего покрытия; центральный ряд — МФ частица в медной оболочке; правый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

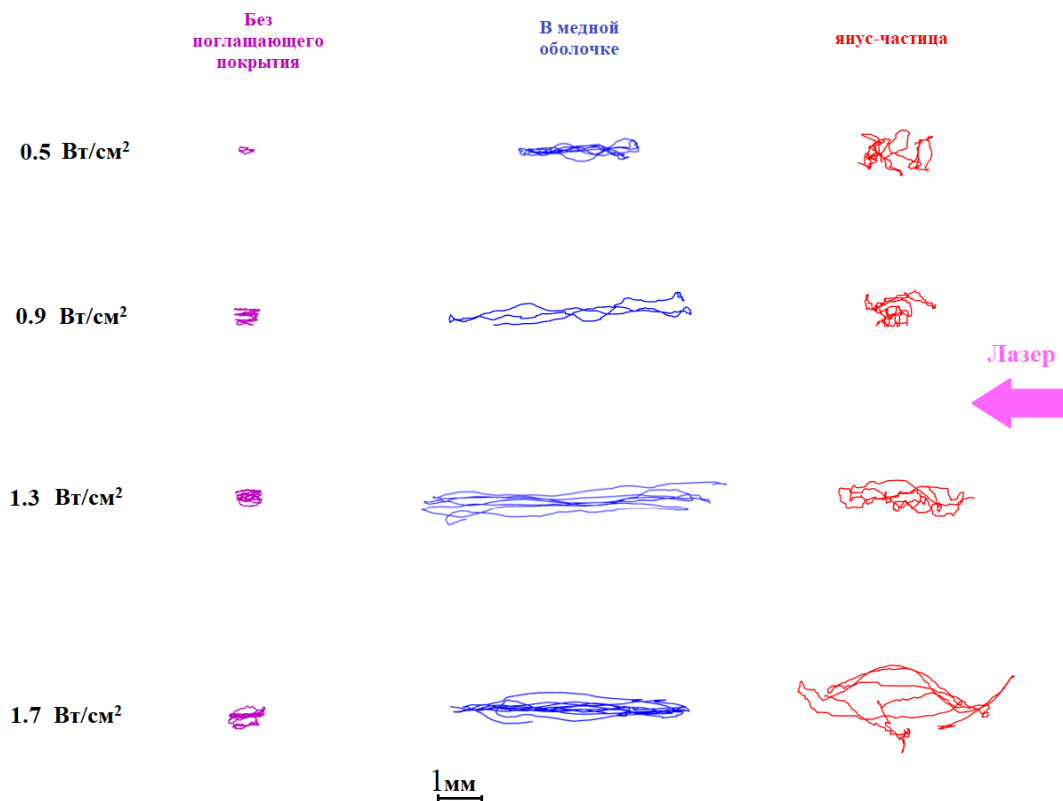


Рисунок 3.3 То же, что и на рис. 3.2, но вид слева (вертикальная составляющая активного движения).

Частицы без поглощающего покрытия 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. Трехмерный характер движения проявляется в значительной вертикальной составляющей активного движения (в отличие от ВЧ разряда [1]). 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 непокрытыми частицами [7]. 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). Также, 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.

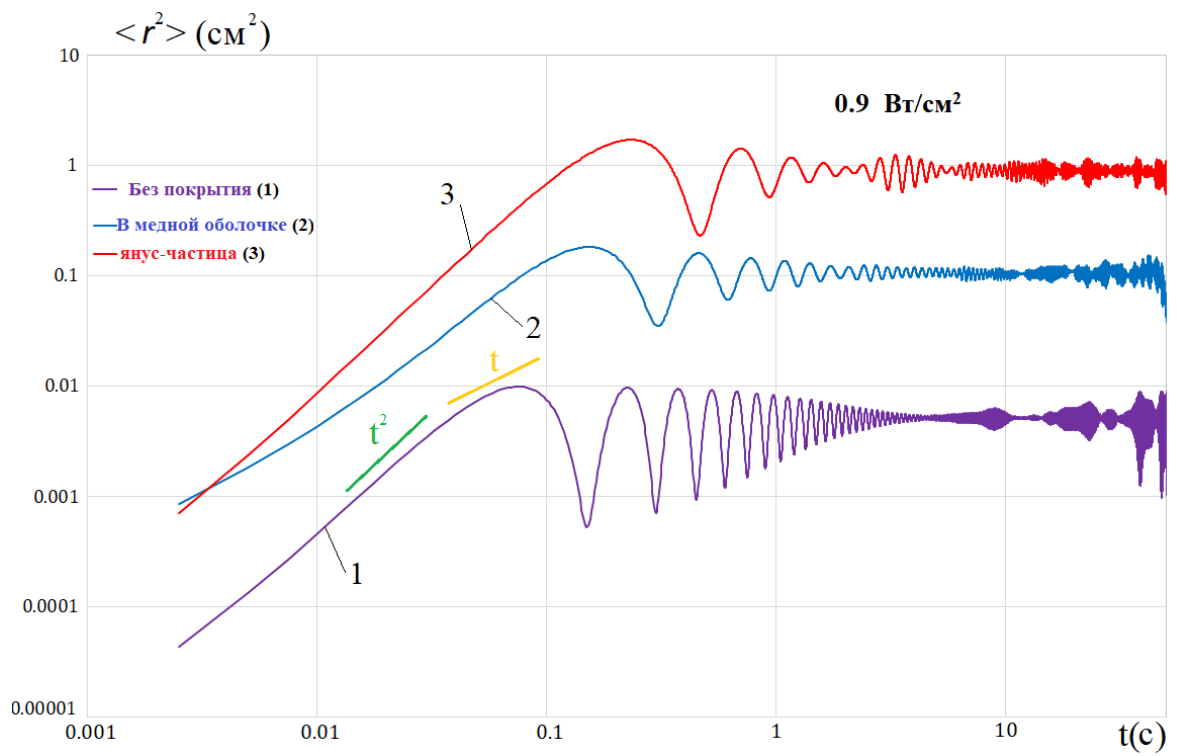
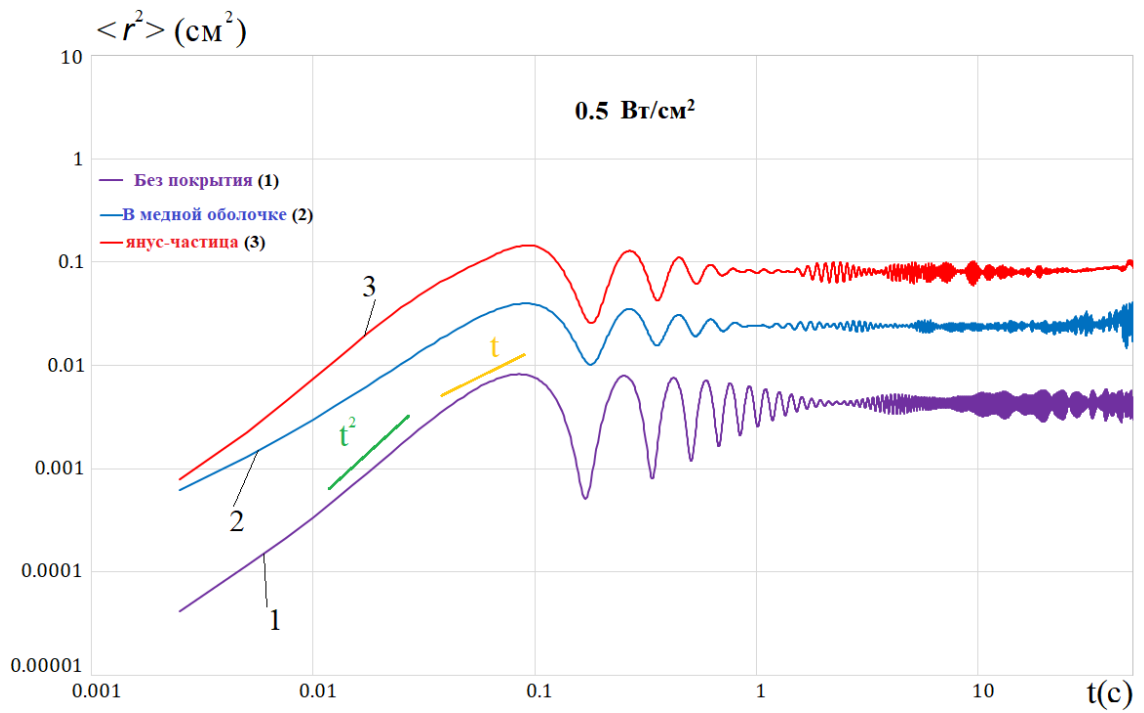
Полученные результаты согласуются с результатами, полученными в квазидвухмерной электростатической ловушке ВЧ разряда [1]. В то же время, активное движение в наших экспериментах отличается меньшей регулярностью по сравнению с работами в ВЧ разряде и проявляет трехмерный характер.

С помощью автоматизированной системы обработки видеоизображений были рассчитаны такие параметры движения как временные зависимости среднеквадратичного смещения частиц, а также их средние кинетические энергии.

Среднеквадратичные смещения определялись по формуле [8]:

$$\langle r^2(t) \rangle = \langle [r(t) - r(0)]^2 \rangle, \quad (1)$$

где $r(0)$ – вектор начального положения частицы, $r(t)$ – положение частицы в момент времени t . В случае одной частицы производится усреднение по времени, графики представлены на рисунке 3.4.



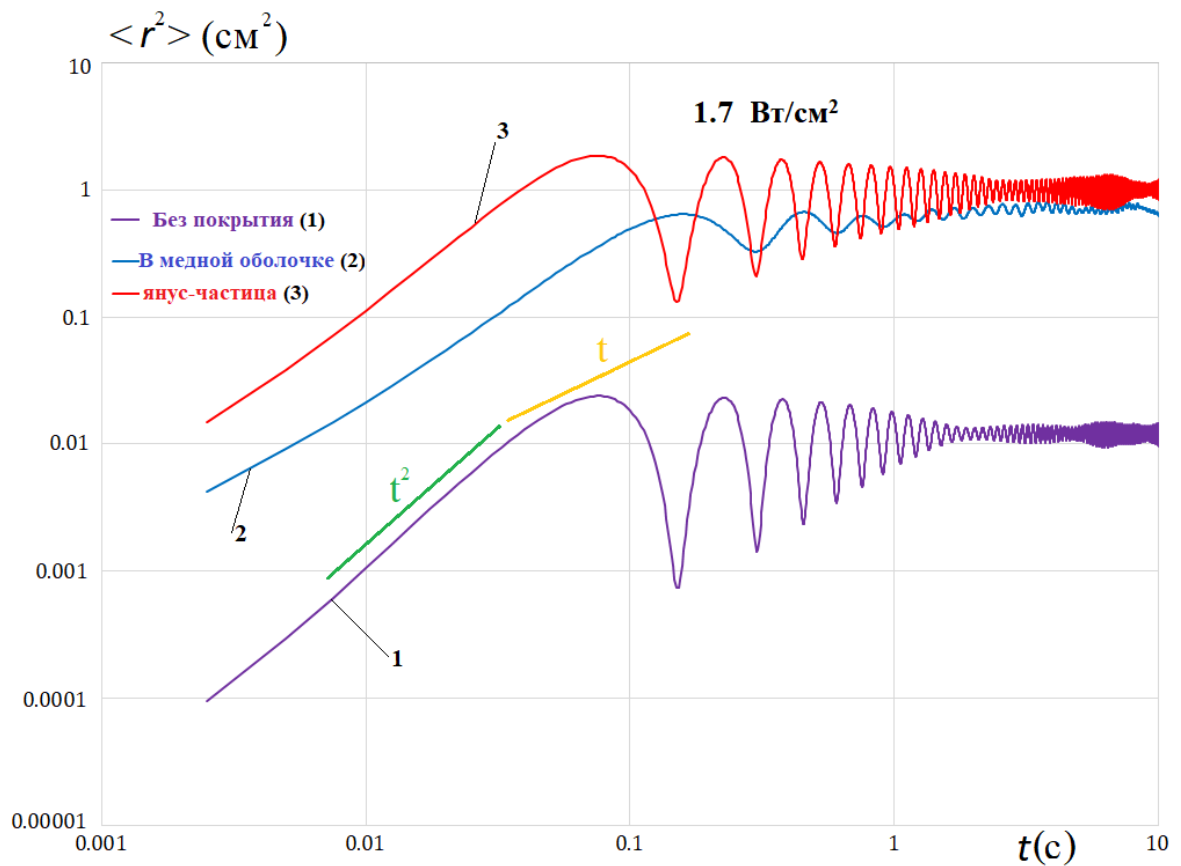
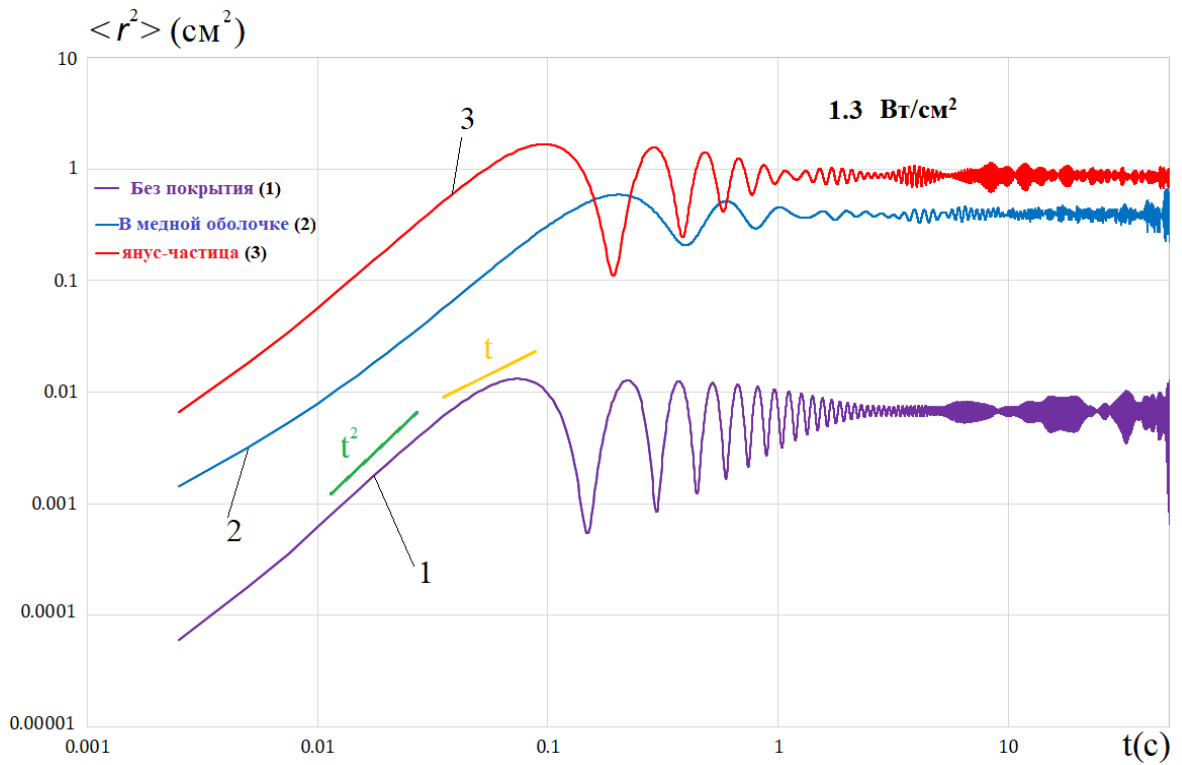


Рисунок 3.4 Среднеквадратичные смещения одиночных частиц под воздействием лазера различной мощности: кривая 1 - для частицы без

поглощающего покрытия; кривая 2 – для МФ частицы в медной оболочке; кривая 3 - для янус-частицы.

Как видно, характер движения подобен движению одиночных частиц в квазидвухмерной ловушке рассмотренному в работе [1] с ВЧ разрядом. Временные масштабы в нашем случае примерно на порядок короче, что объясняется вдвое меньшими размерами частиц и соответственно на порядок меньшей их массой. На малом 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 плотности мощности лазера в диапазоне от 0.5 до 1.7 Вт/см² 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 частиц без поглощающего покрытия мала во всем диапазоне мощностей лазерного излучения, так как они слабо поглощают свет. Для МФ частицы в медной оболочке и янус-частиц наблюдается значительное увеличение кинетической энергии с ростом интенсивности лазерного излучения, что можно объяснить эффективностью фотофореза за счет особенностей поверхности частиц и влиянием радиометрической силы. Также можно наблюдать, что для частиц в медной оболочке и янус-частиц наблюдается скачок на графике $T_k(W_{las})$ при $W_{las} \approx 0.8 - 1.2$ Вт/см², что может быть связано особенностью электростатической ловушки. На рисунках 2 и 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.

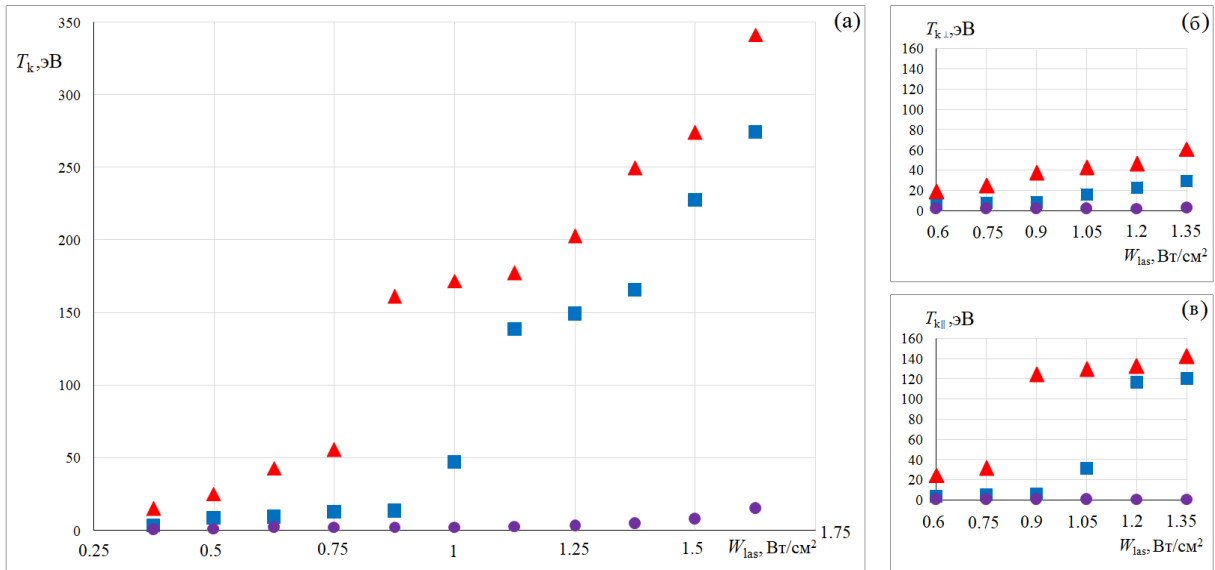


Рисунок 3.5 (а) Зависимость средней кинетической энергии одиночных пылевых частиц от мощности лазера W_{las} ; б) то же, но для продольной (аксиальной) составляющей активного броуновского движения; в) то же, но для поперечной (радиальной) составляющей активного броуновского движения. Частица без поглощающего 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. 5(а)). Для МФ частицы в медной оболочке, как и для янус-частиц, значительное увеличение кинетической энергии можно объяснить увеличением силы фотофореза за счет эффективного поглощения света поверхностью пылевой частицы. На графике $T_k(W_{las})$ для покрытых пылевых частиц и пылевых янус-частиц имеется «скачок». Для выяснения причин этого явления была рассчитана средняя кинетическая энергия активного броуновского движения пылевых частиц вдоль оси трубки, $T_{k||} = 0.5 m_d \langle v_z^2 \rangle$ и поперек it $T_{k⊥} = 0.5 m_d \langle v_x^2 + v_y^2 \rangle$, где m_d масса пылевых частиц, v_x, v_y, v_z компоненты скорости пылевых частиц. Соответствующие графики показаны на рисунках 3.5(б,в). Как можно видеть только зависимость $T_{k||}(W_{las})$ имеет выраженный прыжок. Сильная

аксиальная неоднородность электрического поля в полосах разряда постоянного тока является возможной причиной наблюдаемого явления [9].

Также возможен и другой механизм возникновения подобного эффекта [10]. В результате увеличения мощности воздействия лазерного излучения увеличивается амплитуда колебаний частиц в горизонтальной плоскости, вместе с этим увеличивается амплитуда флуктуаций заряда частицы, в результате этого увеличивается флуктуация силы электрического происхождения, которая действует в вертикальной плоскости, таким образом увеличивается подкачка кинетической энергии в вертикальной составляющей, эффект описывается следующей формулой:

$$\Delta T_z = \frac{\langle \delta x^2 \rangle g^2 M}{\langle Q^2 \rangle v^2 \left[1 + \frac{\omega_z^2}{\omega_x^2} \right]}, \quad (2)$$

где $\langle \delta x^2 \rangle$ - среднеквадратичное смещение по горизонтальной оси, g – ускорение свободного падения, M – масса частицы, $\langle Q^2 \rangle$ - средний заряд частицы, ν^2 -коэффициент трения частицы, ω_z^2, ω_x^2 – частоты по осям z и x соответственно.

3.4. Заключение и выводы по Главе 3

Экспериментально исследован характер движения одиночных сферических пылевых частиц МФ без поглощающего покрытия и с поглощающей поверхностью в объеме нижнего слоя тлеющего разряда постоянного тока под действием лазерного излучения. Все рассмотренные частицы имели примерно одинаковый размер ($d \approx 5$ мкм) и массу. Все отличия заключаются в тонком поверхностном слое. В частности, анализируются пылевые частицы МФ без поглощающего покрытия, МФ частицы в медной оболочке и частично покрытые медью частицы (янус-частицы). Эксперименты проводятся при одних и тех же параметрах разряда для всех рассматриваемых типов пылевых частиц.

Для 3D-анализа использовалась методика записи двумя синхронизированными видеокамерами. Объективы камер располагались под углом

90°. Полученные изображения обрабатывались на компьютере с помощью специального программного обеспечения для получения трехмерных динамических характеристик исследуемых пылевых частиц.

Показано, что пылевые частицы в трехмерной электростатической ловушке разряда постоянного тока под действием лазерного излучения совершают активное броуновское движение, т.е. преобразуют энергию излучения в кинетическую энергию собственного направленного движения.

Экспериментально показано, что воздействие лазерного излучения на частицу без поглощающего покрытия является наименьшим по сравнению с другими 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 МФ частиц в медной оболочке представляют собой суперпозицию вытянутых вдоль направления лазерного луча эллипсов со случайной составляющей. Активное броуновское движение янус-частиц может характеризоваться наименьшей регулярностью.

Таким образом, янус-частицы проявляют наиболее ярко выраженные свойства активного броуновского движения. Следует ожидать, что большой ансамбль янус-частиц приобретет новое физическое свойство, заключающееся в лазерно-управляемом коэффициенте диффузии. С другой стороны, можно будет управлять кинетической температурой пылевой компоненты низкоинтенсивным лазерным излучением. Важно, что остальные параметры плазмы (давление, температура, плотность и др.) при этом остаются практически постоянными. В свою очередь, управление кинетической температурой пылевой составляющей связано с управлением параметром связи Γ , пылезвуковой скоростью, давлением пылевой составляющей и т.д.

ГЛАВА 4. СТРУКТУРЫ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. Квазиодномерные (цепочечные) структуры в плазме тлеющего разряда при воздействии лазерного излучения

В данной главе представлены экспериментальные результаты исследования активного броуновского движения частиц, их динамика, а также формирование в цепочечных структурах 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 необходимо выяснить, является ли движение частиц в кластерах активным броуновским. 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.

Проведено исследование активного броуновского движения пылевых частиц, формирующих квазиодномерные (цепочечные) структуры, содержащие 11 микрочастиц под действием лазерного излучения. Активное движение частиц индуцировалось лазерным излучением, нагревающим поглощающую поверхность частиц. Сильное взаимодействие заряженных частиц приводило к более сложному поведению наблюдаемых структур.

4.2. Экспериментальные данные

Эксперимент проведён на установке тлеющего разряда постоянного тока с использованием для диагностики одной высокоскоростной камеры, подробнее было описано выше в главе 2. Давление в трубке составляло 7.5 Па и поддерживалось непрерывной подачей рабочего газа со скоростью 2 стандартных см³/мин. Сила тока составляла $I = 0.75$ мА при напряжении $U = 1.6$ кВ.

В эксперименте использовались следующие типы монодисперсных сферических меламин-формальдегидных (МФ) частиц диаметром $D \approx 5$ мкм: МФ частицы в медной оболочке; частицы с частичным медным покрытием (янус-частицы), подробное описание свойств и параметров данных типов частиц было приведено в главе 3.

Источником энергии активного броуновского движения частиц являлся твердотельный лазер с длиной волны 532 нм, мощность которого можно было варьировать. С помощью системы оптических линз лазерный луч был расширен до диаметра 10 мм и направлен таким образом, чтобы он полностью покрывал зону движения частиц и, при этом, был перпендикулярен оси трубки. Этот же лазер использовался для визуализации пылевой структуры.

Движение пылевых частиц фиксировалось высокоскоростной видеокамерой. Частота записи составляла 400 кадров в секунду при разрешении 512x512 (19,6 мкм/пиксель). Полученные данные обрабатывались при помощи специализированных компьютерных программ.

Рассмотрим силы, действующие на пылевые частицы в исследуемой разрядной плазме. Как показано в главе 3 динамика одиночных пылевых частиц в тлеющем разряде определяется следующими силами: силой гравитации, F_g ; кулоновской силой со стороны электрического поля разряда, F_E ; силами ионного и нейтрального увлечения F_{id} , F_{nd} ; фотофоретической силой F_f . При этом состояние равновесия обеспечивалось тремя силами F_g , F_E , F_{id} .

В нашем случае к указанным силам добавляются силы взаимодействия между частицами в квазиодномерной цепочке [1-3]. Считается, что заряженная пылевая частица в тлеющем разряде формирует конфигурацию ионного потока, содержащего ионный фокус. Параметры ионного фокуса определяются в первую очередь зарядом частиц.

В нашем эксперименте частицы имели примерно одинаковую массу m_d и размеры D . Согласно известным моделям [4], величина заряда частицы, погруженной в газовый разряд, зависит от её радиуса. Следовательно, заряд исследуемых частиц, Z можно считать одинаковым. Таким образом, при одинаковых условиях разряда и отсутствии лазерного воздействия плазменно-пылевые структуры двух исследуемых типов (содержащих МФ частицы в медной оболочке и янус-частицы) обладали примерно одинаковой динамикой. В таком случае, нет необходимости точно измерить указанные выше силы, а достаточно обеспечить одинаковые параметры разряда для двух типов используемых частиц.

Рассмотрим теперь силы, определяющие их активное движение. Как показано в работе [5], механизмы активности, выводящие системы плазма-пылинка из состояния равновесия основаны на фотофоретических силах, что в свою очередь приводит к действию радиометрической силы. Причем, с одной стороны фотофорез обеспечивается температурными градиентами на поверхности частиц. В этом случае возникает асимметрия силы нейтрального увлечения. Этот механизм реализовывается для всех частиц, используемых в эксперименте. С другой стороны, для янус-частиц возникают дополнительные фотофоретические эффекты, связанные с различием коэффициентов аккомодации на разных участках поверхности частицы.

Градиенты температуры и коэффициентов аккомодации, наряду с вращением частицы вокруг оси, могут создавать нескомпенсированные силы, вызывающие ее активное движение (в частности, возникновение орбитального вращения [6]). Ожидается, что действие фотофоретической силы будет существенно разным для частиц с разным типом поверхности. янус-частица, освещенная лазерным

излучением, может иметь наиболее заметные температурные градиенты на поверхности за счет ее неоднородности. Это приводит к сильным фотофоретическим эффектам, которыми можно управлять посредством изменения интенсивности лазерного излучения, I_L , которая пропорциональна мощности лазера $P_L \sim I_L$. Отметим, что для МФ частиц в медной оболочке радиометрическая сила также является фактором активности.

4.3. Анализ экспериментальных данных

В процессе эксперимента микрочастицы заданных типов инжектировались в объем разрядной плазмы тока, где в результате баланса рассмотренных сил наблюдалось формирование квазиодномерных (цепочечных) структур (рисунок 4.1). 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 части представлено на рисунке 4.2.

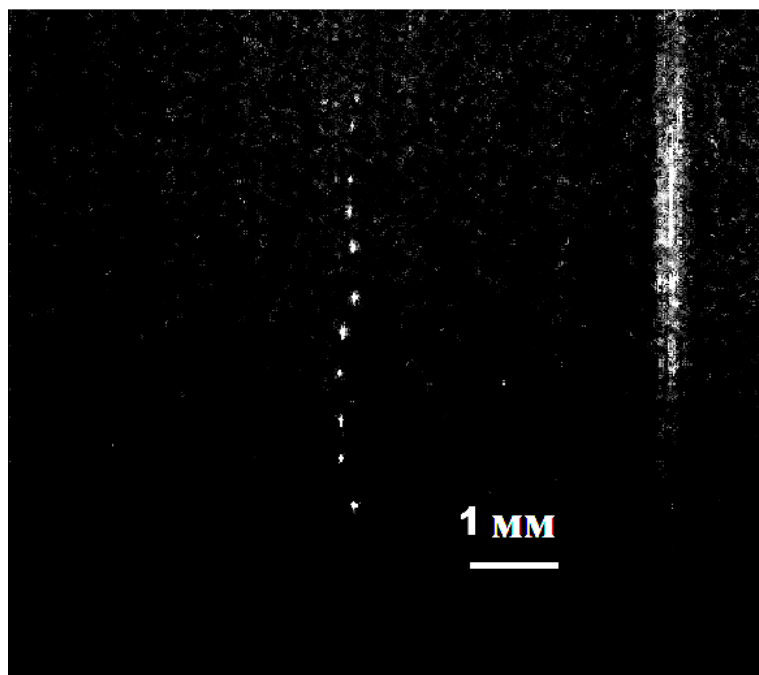


Рисунок 4.1 Фотография квазиодномерной цепочечной структуры.

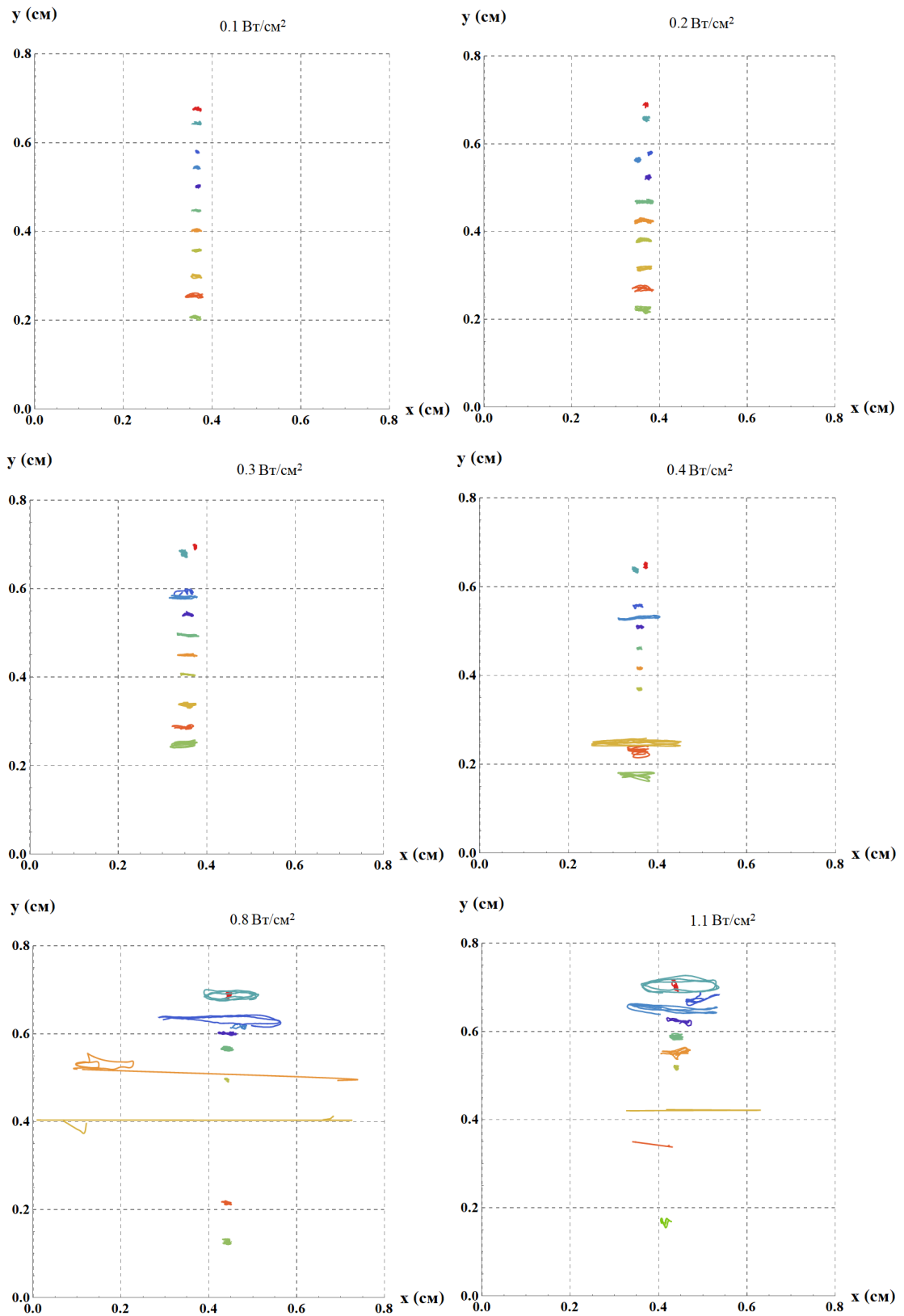


Рисунок 4.2 Траектории МФ частиц в медной оболочке в цепочечной структуре в страте тлеющего разряда за промежуток времени $\Delta t=0.5$ с, при различной интенсивности лазерного излучения.

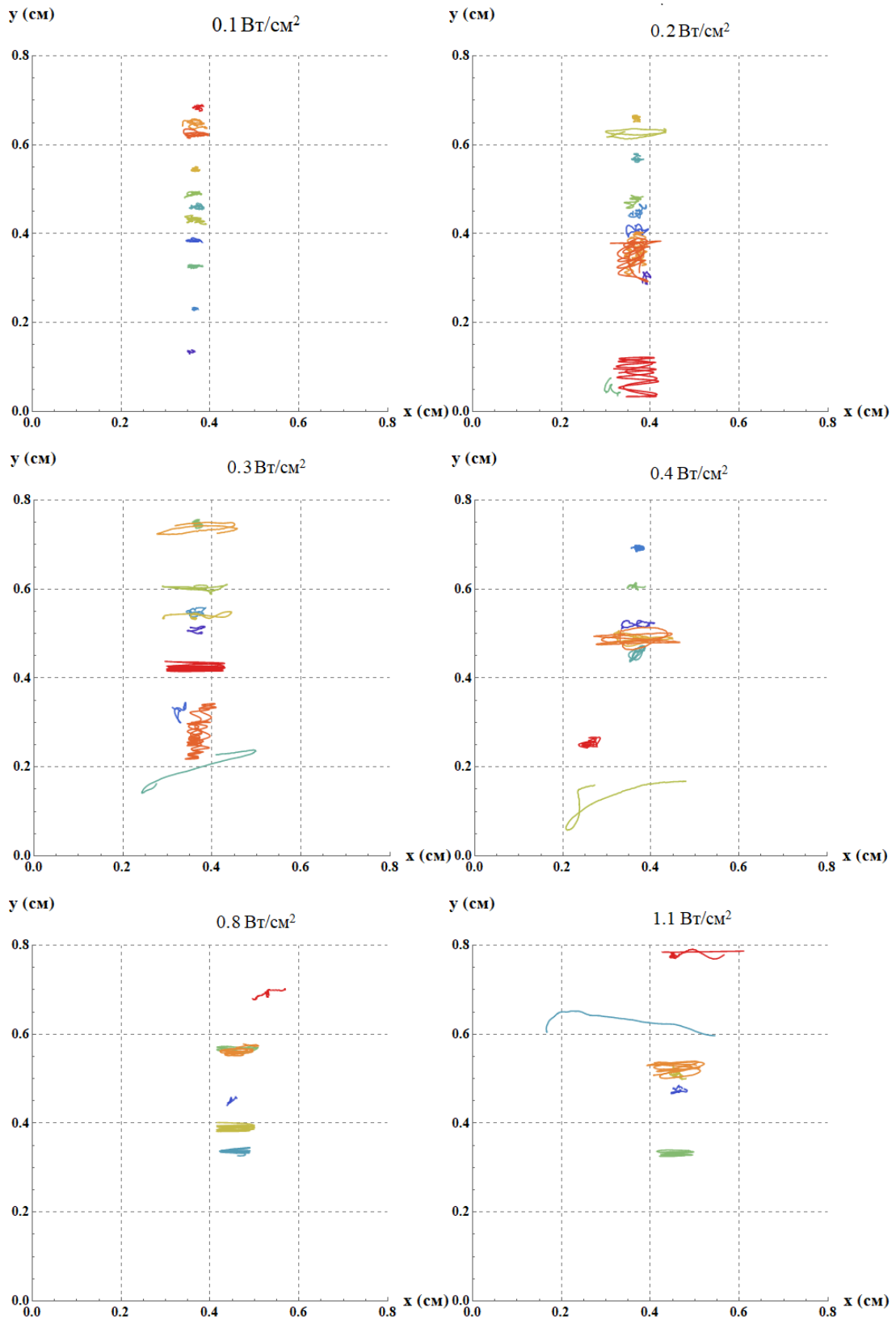


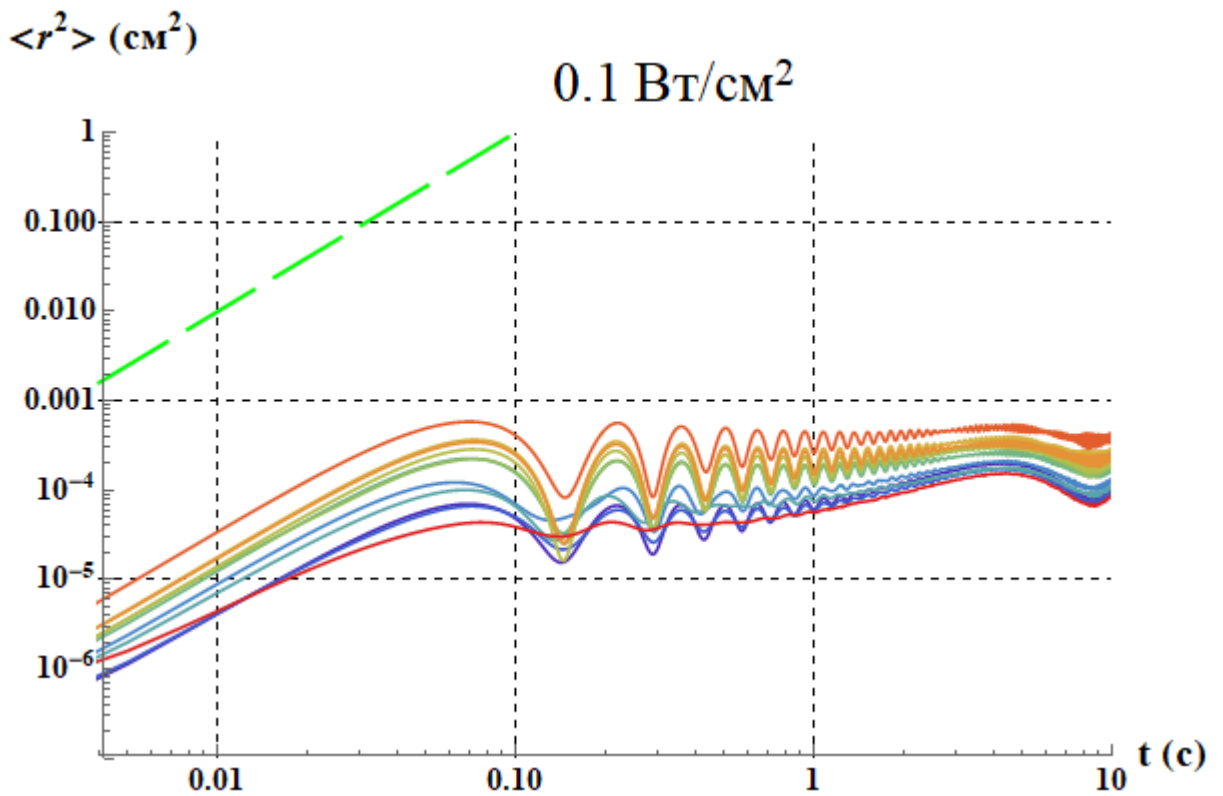
Рисунок 4.3 Траектории янус-частиц в цепочечной структуре в страте тлеющего разряда за промежуток времени $\Delta t=0.5$ с, при различной интенсивности лазерного излучения.

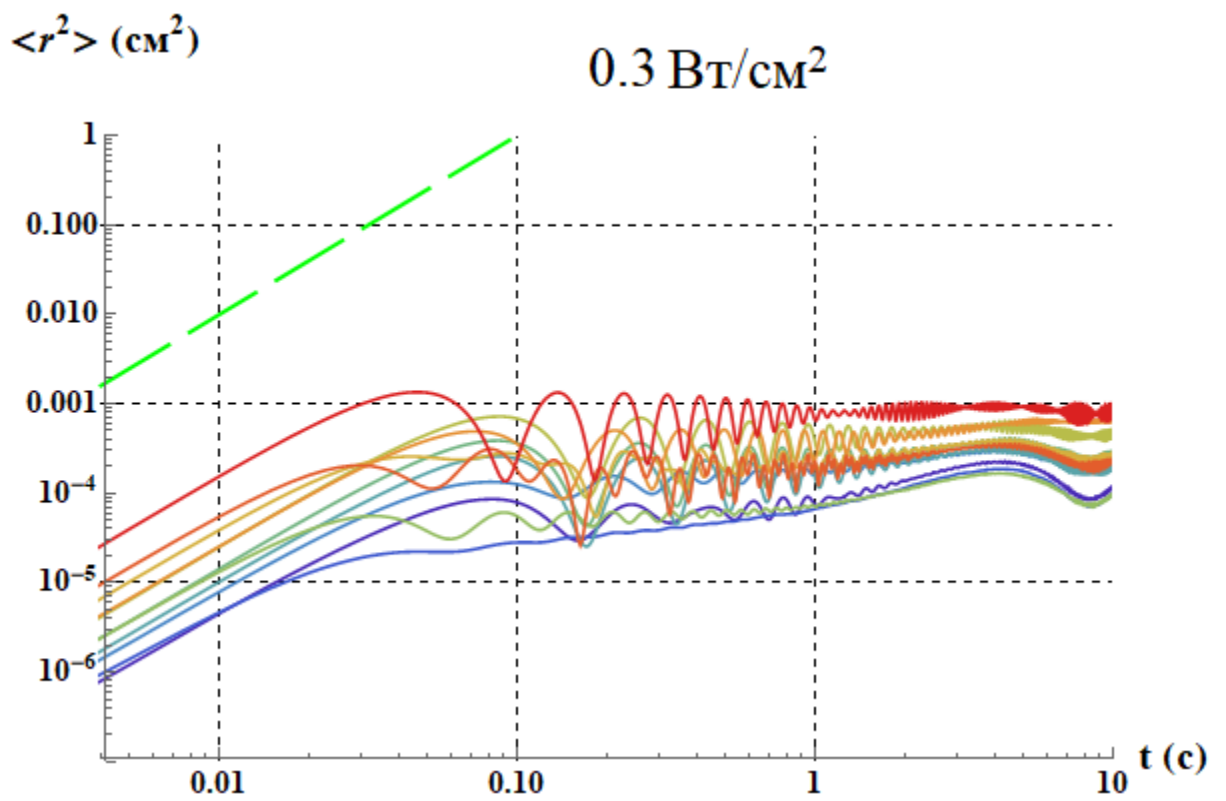
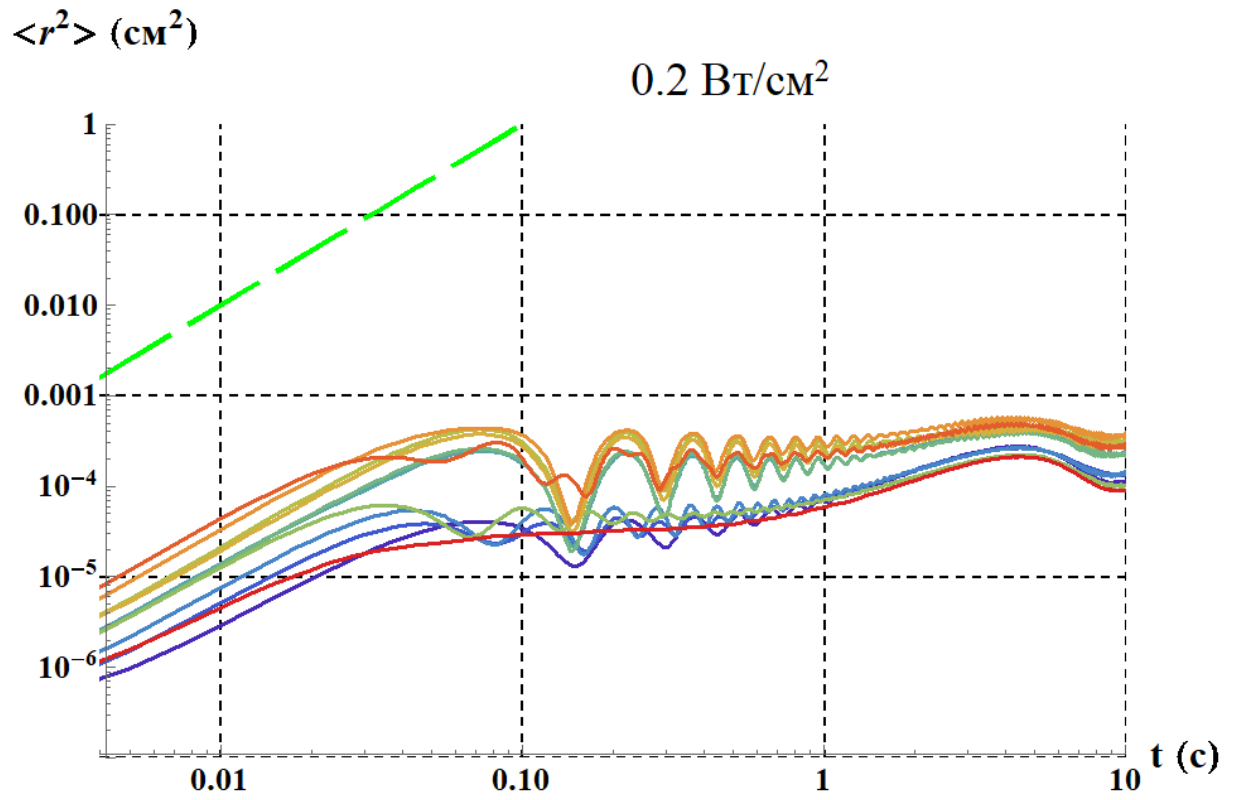
Как видно, при минимальной мощности лазера, частицы обоих типов формируют продольную цепочечную структуру. Это состояние соответствует минимальной кинетической энергии частиц. Потенциальной энергии межчастичного взаимодействия, которая обусловлена кулоновскими силами и наличием ионного фокуса, достаточно для формирования упорядоченной цепочки. Однако, динамика частиц начинает драматически 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 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.

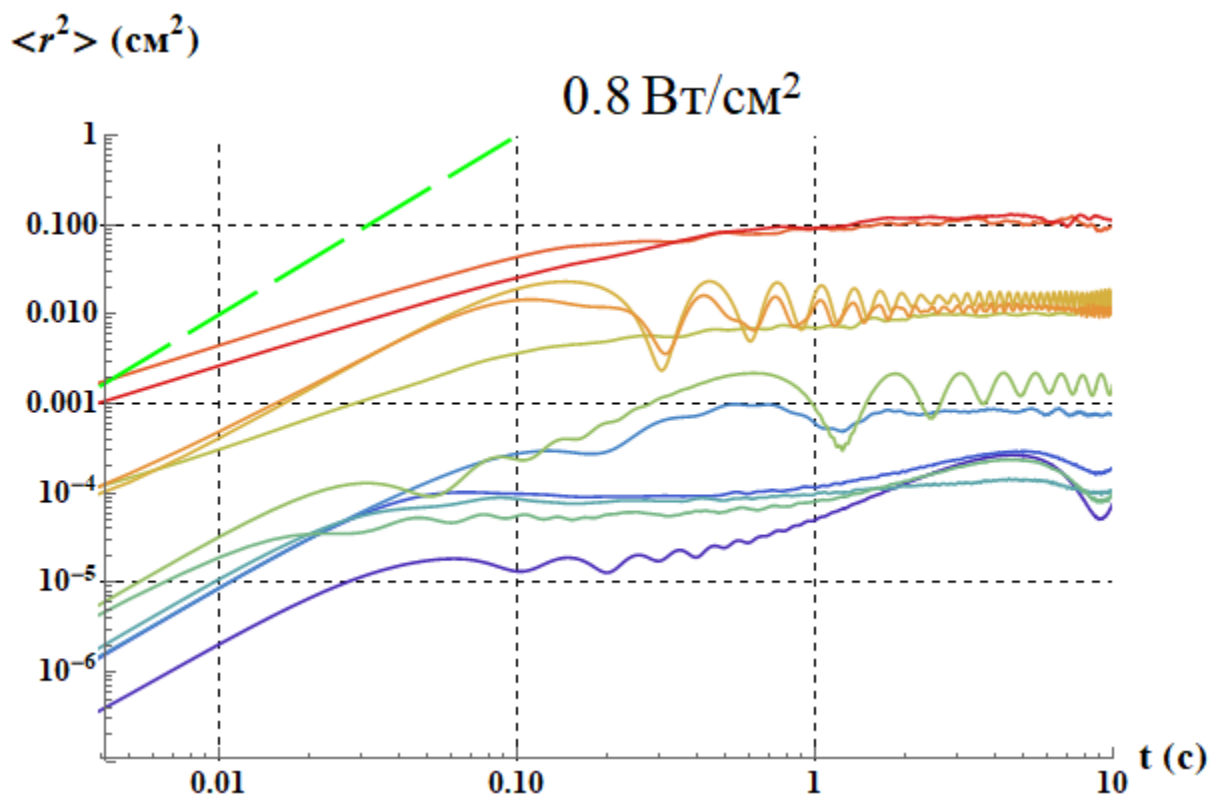
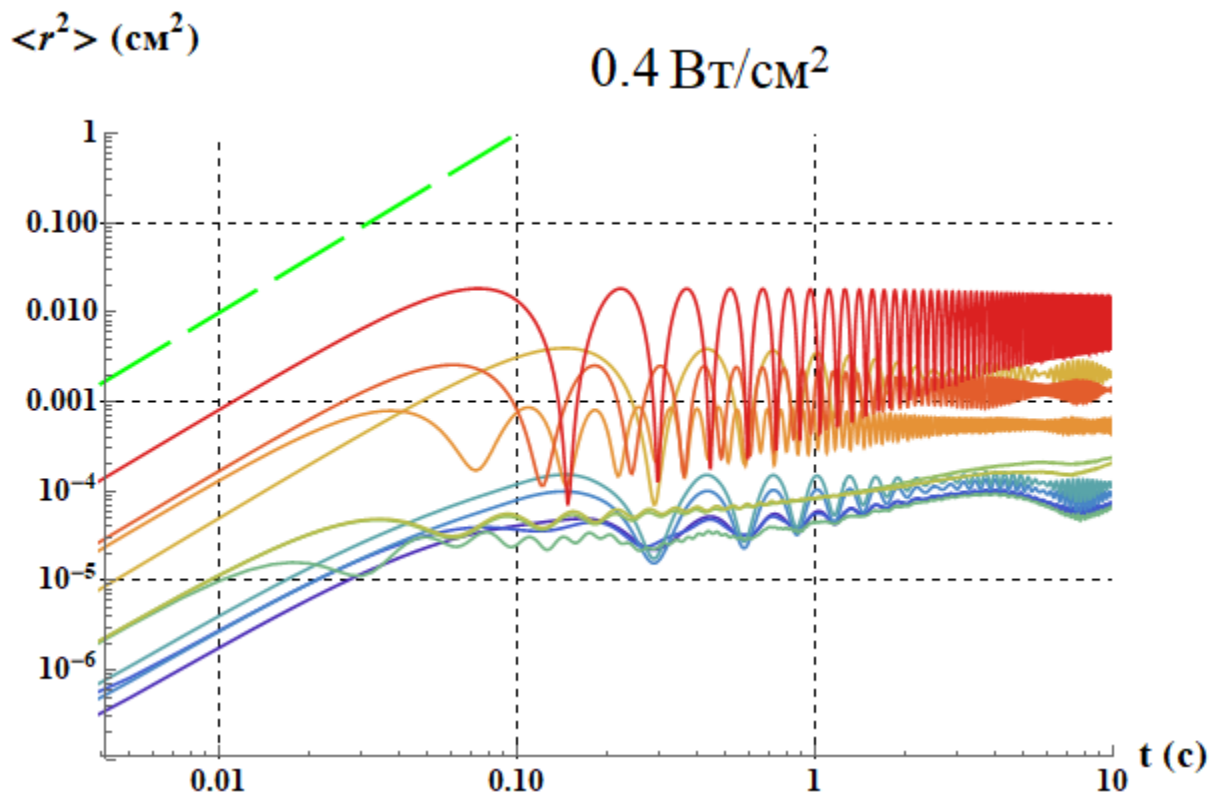
Согласно современным представлениям за отрицательно заряженными пылевыми частицами в бесстолкновительной плазме формируется ионный фокус [7,8]. При этом считается, что вторая и последующие макрочастицы, формирующие пылевую цепочку, взаимодействуют как с отрицательно заряженными макрочастицами, так и с положительным ионным фокусом. Такое дипольное приближение кильватерного взаимодействия обычно приводится для объяснения формирования цепочечных пылевых структур, наблюдаемых в лабораторных экспериментах. Однако, анализ траекторий микрочастиц, в наших экспериментах указывает на необходимость более детального исследования механизма

формирования цепочечных структур в тлеющем разряде постоянного тока. Действительно, несмотря на некогерентное движение частиц и их значительное смещение в горизонтальной плоскости не происходит разрушения цепочечной структуры из МФ частиц в медной оболочке.

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







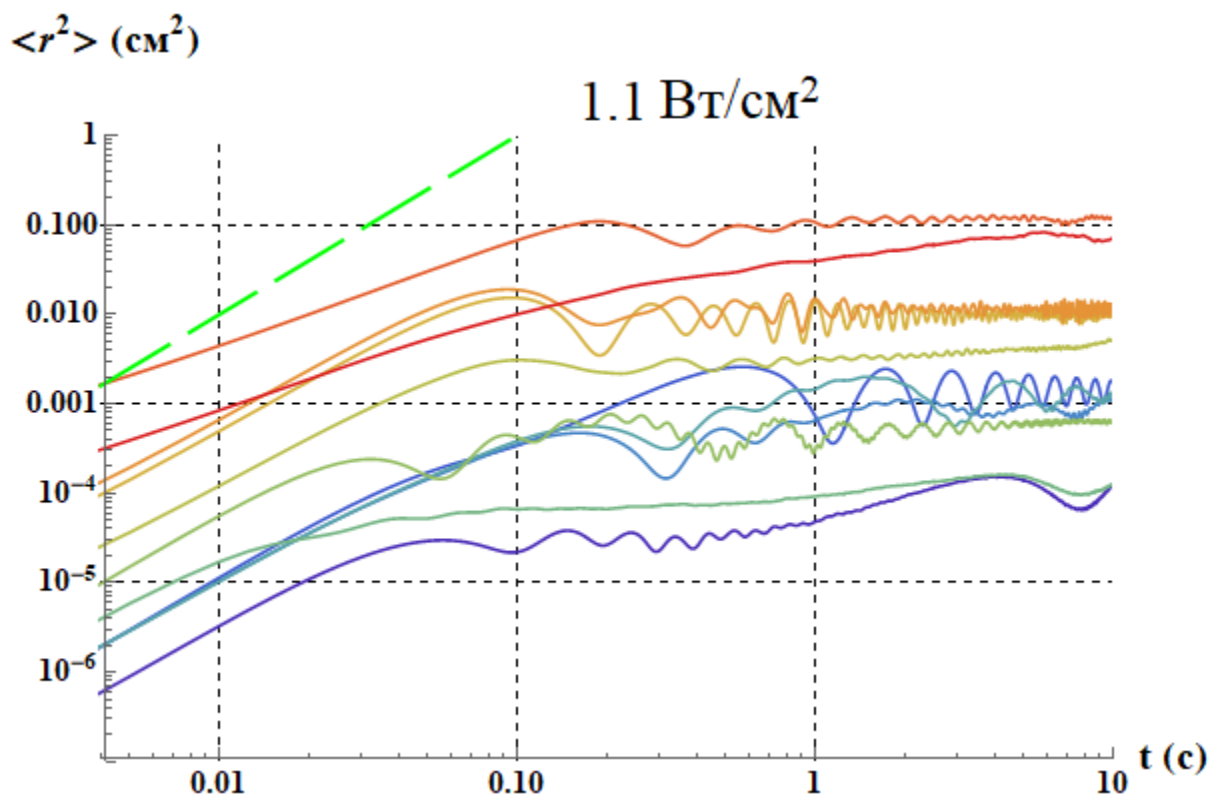
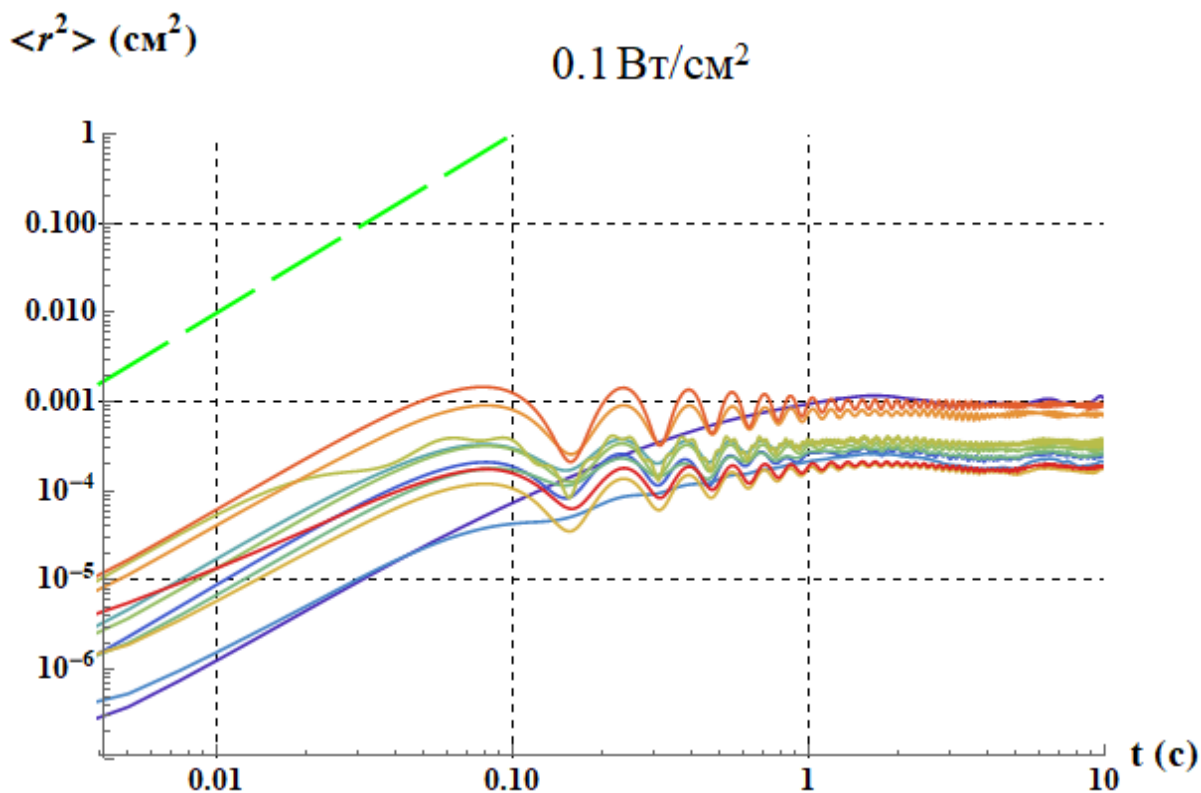
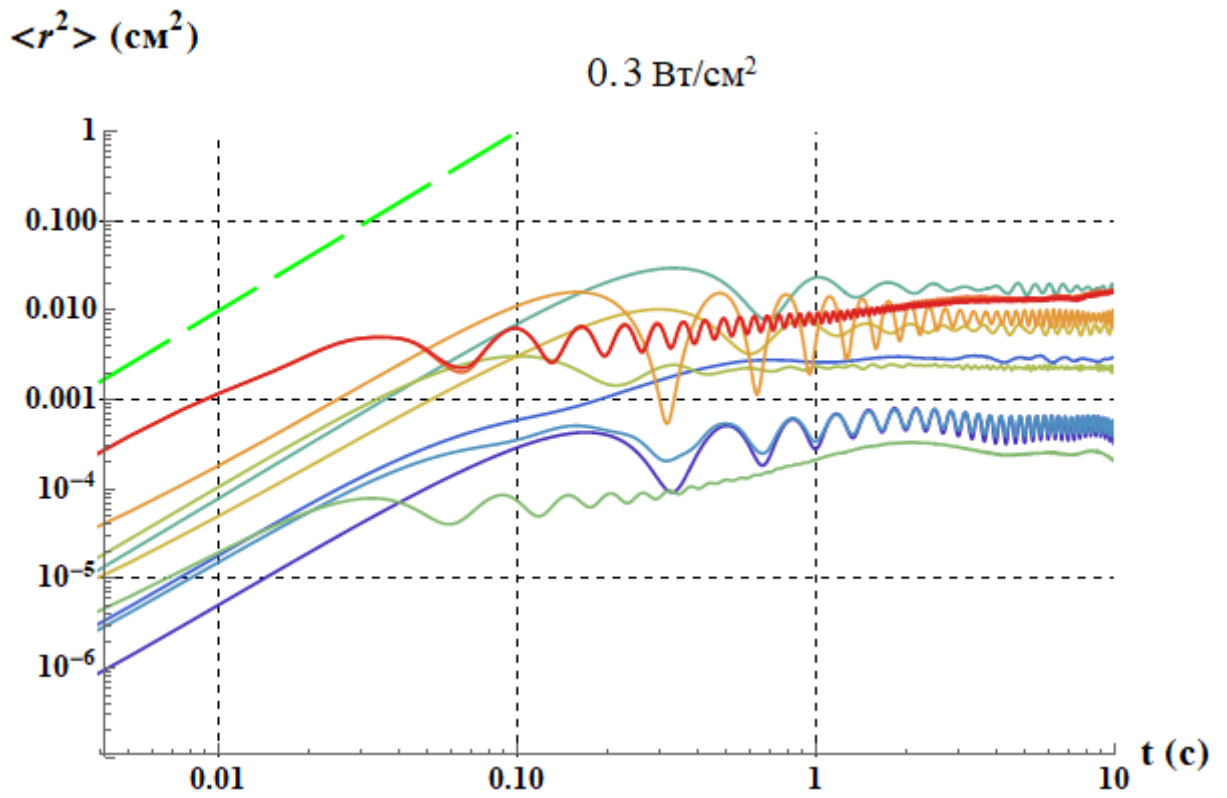
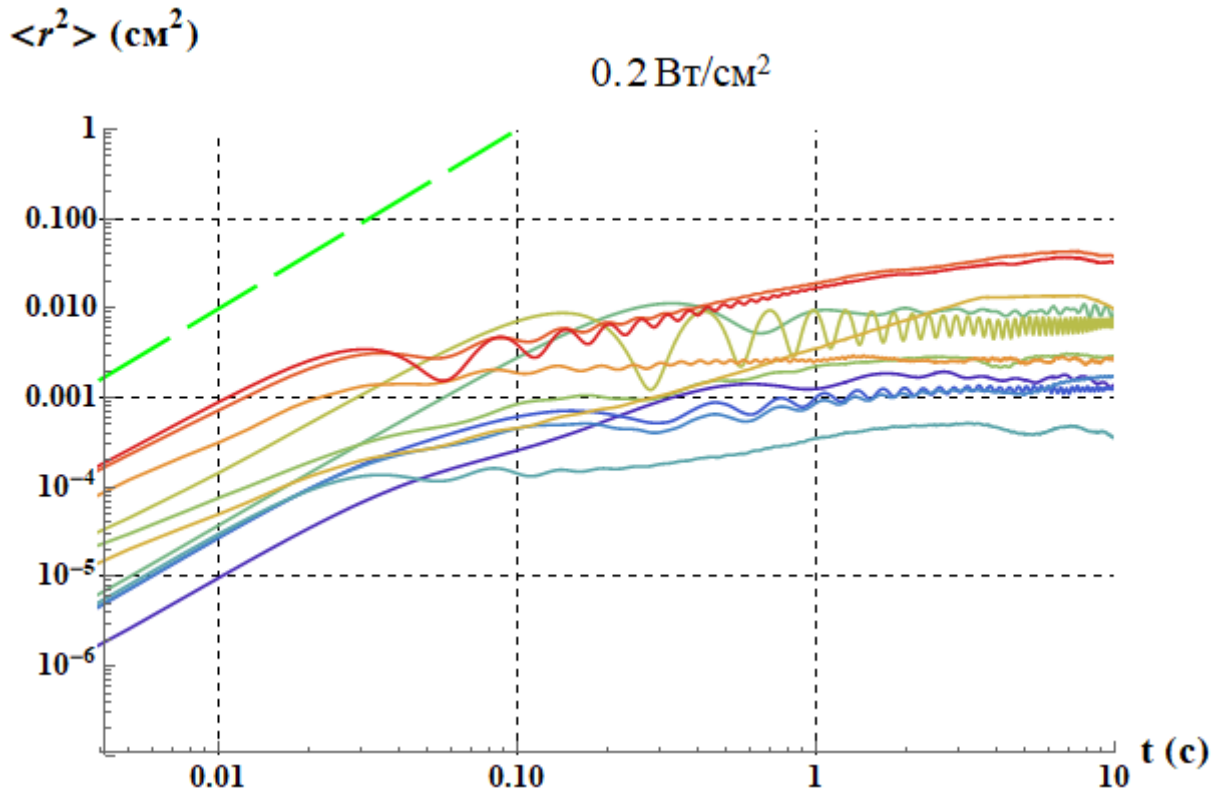
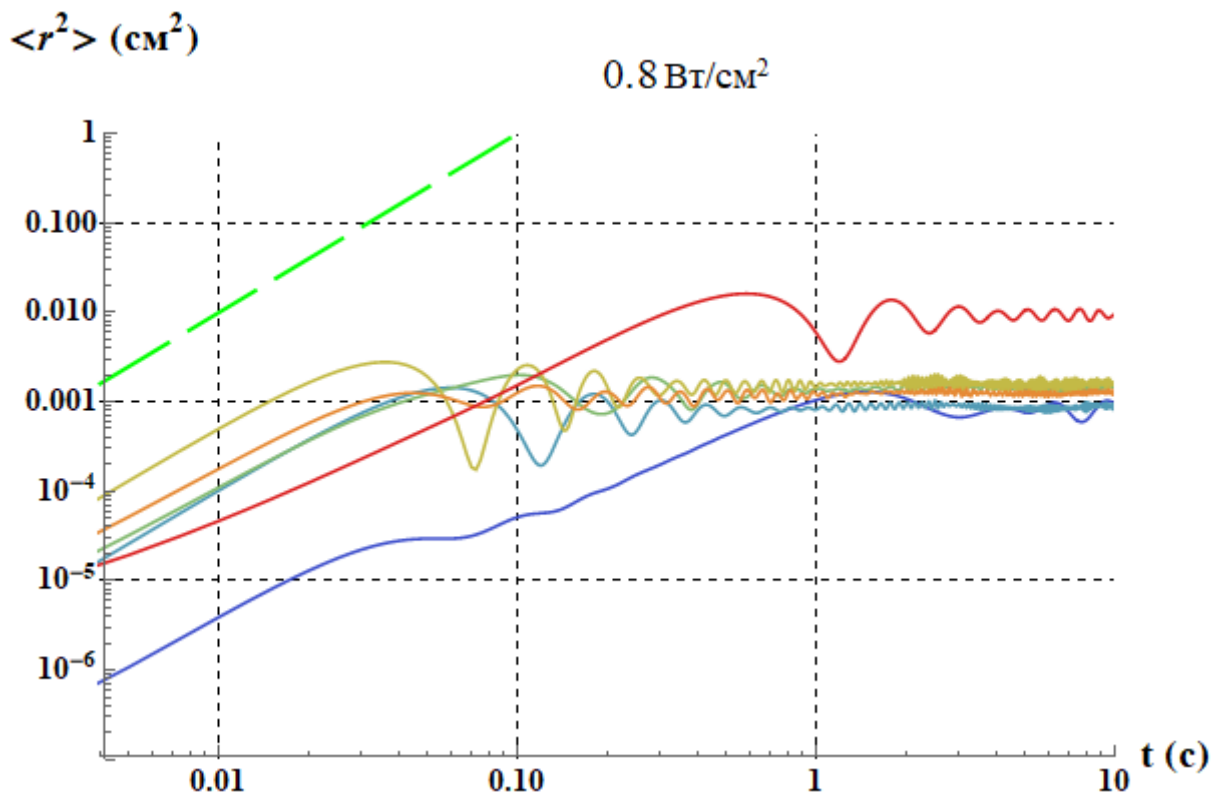
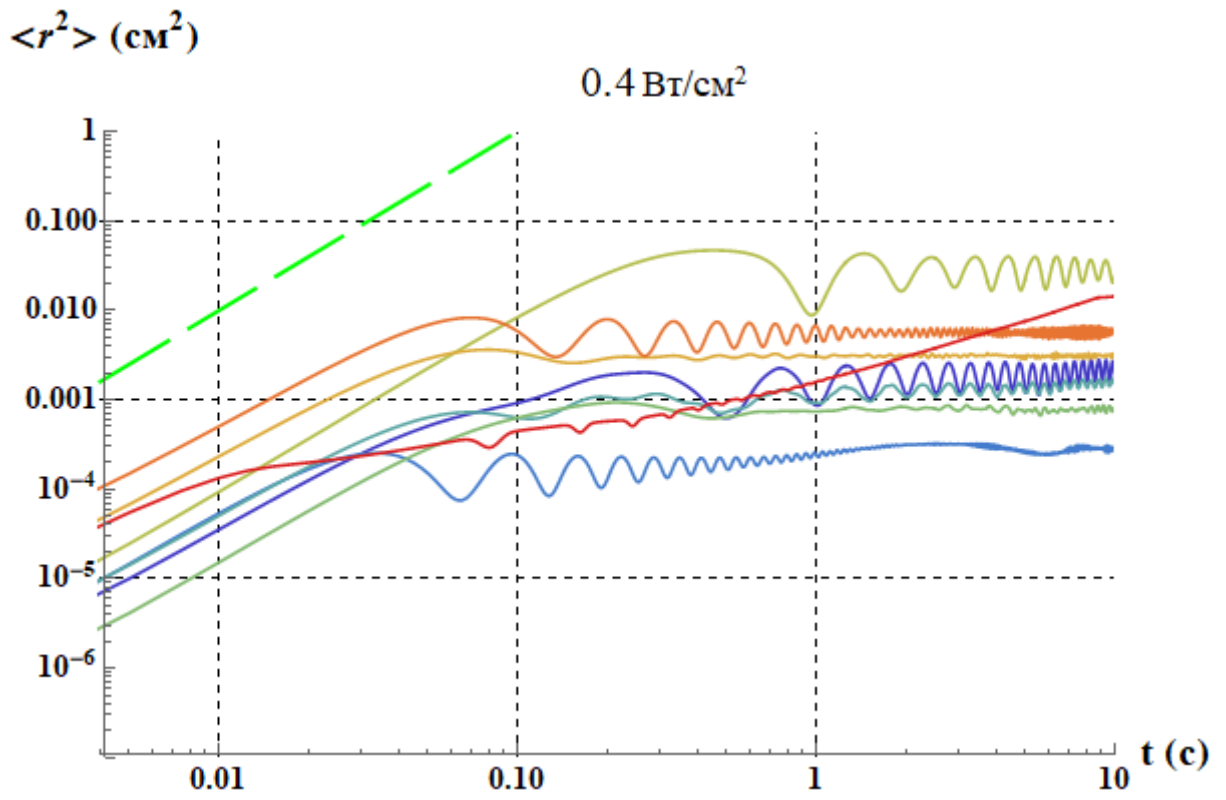


Рисунок 4.4 Среднеквадратичные смещения от времени при различной интенсивности лазерного излучения для МФ частиц в медной оболочке.







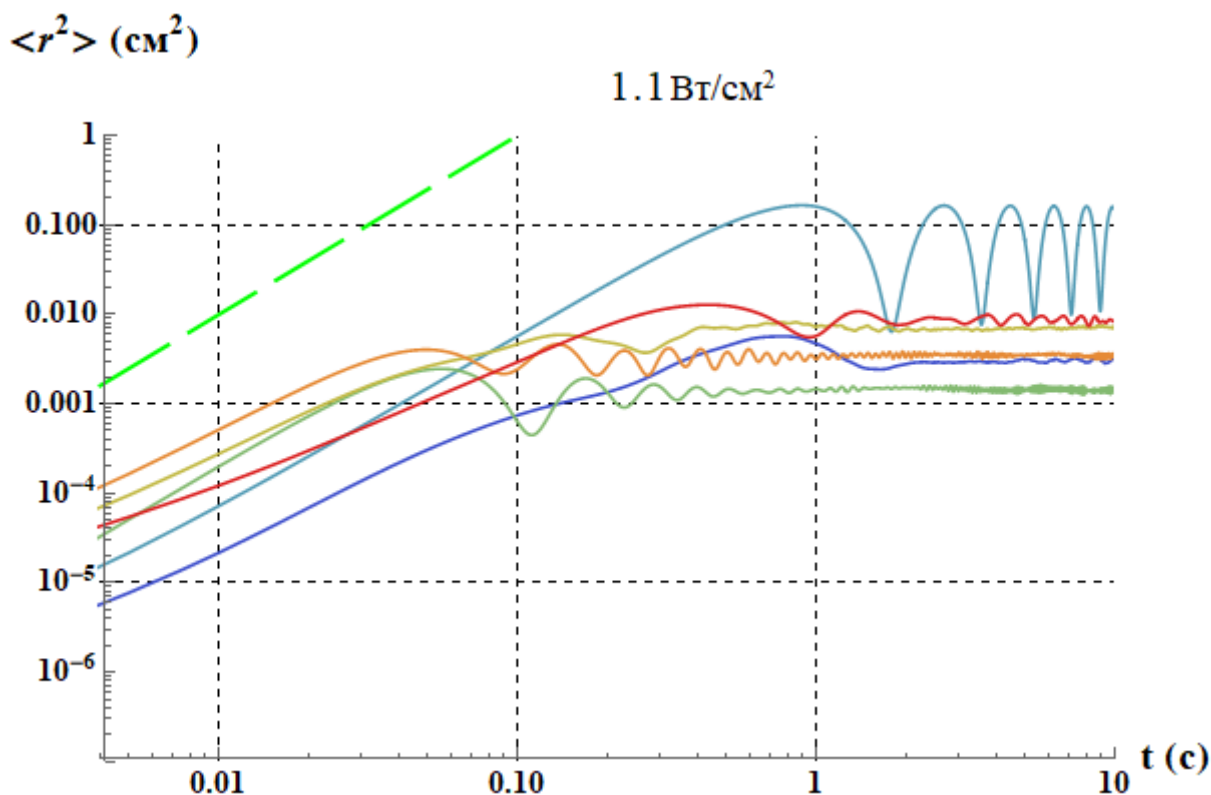


Рисунок 4.5 Среднеквадратичные смещения от времени при различной интенсивности лазерного излучения для янус-частиц.

На малом временном масштабе графики демонстрируют баллистический режим движения с асимптотикой $\sim t^2$ (штриховая линия) для всех частиц. Начиная с момента времени $t \sim 0.1$ с наблюдается режим движения «в ловушке» с определенным периодом (см. подробнее [9], рис. 4b при $a=1$). Так же, как и в [10] асимптотик $\sim t^{3/2}$, характерных для активного броуновского движения в классической пространственно однородной системе (без ловушки) в наших экспериментах не обнаружено (подробнее см. [11]). 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. 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 4.5 представлена зависимость от I для кинетической энергии частиц, усредненной по времени ($T=60$ с) и по ансамблю частиц.

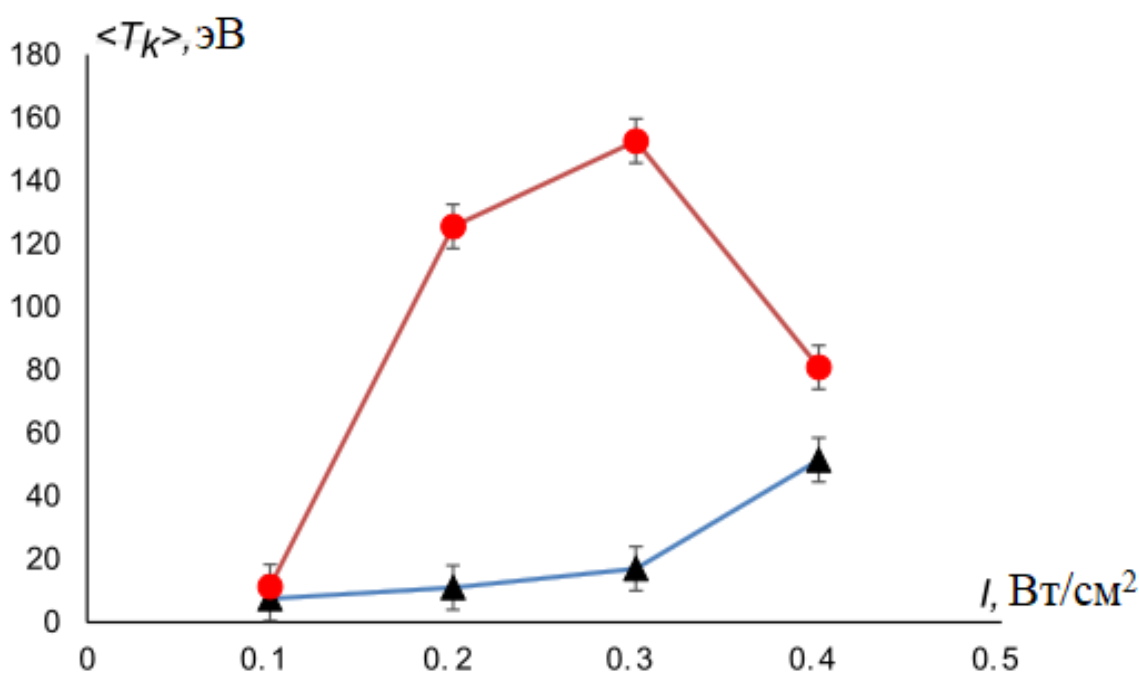


Рисунок 4.6 Зависимость усредненной по времени и по ансамблю кинетической энергии частиц от интенсивности лазерного излучения: треугольники – цепочка из покрытых частиц, кружки – цепочка из янус-частиц.

Из рисунка 4.6 видно, что незначительное увеличение интенсивности лазерного излучения приводит к увеличению кинетической энергии частиц на порядок (для 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 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 $I = 0.4$ Вт/см². Следует отметить, что

кинетическая энергия микрочастиц значительно превышает среднюю кинетическую энергию атомов буферного газа ($T_n \sim 0.03$ эВ), что указывает на активный характер движения.

С увеличением интенсивности лазерного излучения в диапазоне от 0.1 до 0.4 Вт/см² средняя кинетическая энергия пылевых частиц увеличивалась на порядок и более. Все частицы цепочки совершали преимущественно круговое движение около своих положений равновесия в радиальной плоскости. Радиус кругового движения возрастал с ростом интенсивности излучения. Сохранение цепочечной структуры при малых плотностях мощности, по-видимому, свидетельствует от пространственной размытости ионного фокуса, который предположительно может являться одним механизмов формирования цепочек. Для определения механизмов формирования цепочечных структур в тлеющем разряде необходимы дополнительные исследования.

Исследуемые системы активных броуновских частиц являются 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 [12] была предложена динамическая энтропия. В данной работе используется приближение, называемое “динамической энтропией первого пересечения” [13]. При условии, что пространственный масштаб ε не слишком мал [14], динамическую энтропию можно приближенно подсчитать, описав в момент времени $t = 0$ вокруг частицы сферу радиуса ε с центром в точке нахождения частицы, а затем определив момент времени τ , в который траектория впервые достигнет порогового значения ε . Усредняя это “время первого пересечения” (mean first-passage time, MFPT) $\tau(\varepsilon)$ по всем частицам системы, получаем “динамическую энтропию первого пересечения” $S(\varepsilon) \equiv 1/\tau(\varepsilon)$, где $\tau(\varepsilon) = \int_0^\infty P_\varepsilon(t) t dt$, а $P_\varepsilon(t)$ – вероятность того, что частица достигнет границы сферы ε в момент времени между t и $t + dt$.

Для всех рассмотренных состояний системы из МФ частиц в медной оболочке были получены (рисунок 4.7) зависимости динамической энтропии первого пересечения от нормированного параметра огрубления $\varepsilon^* = \varepsilon/L_p$, где L_p – среднее расстояние между частицами структуры.

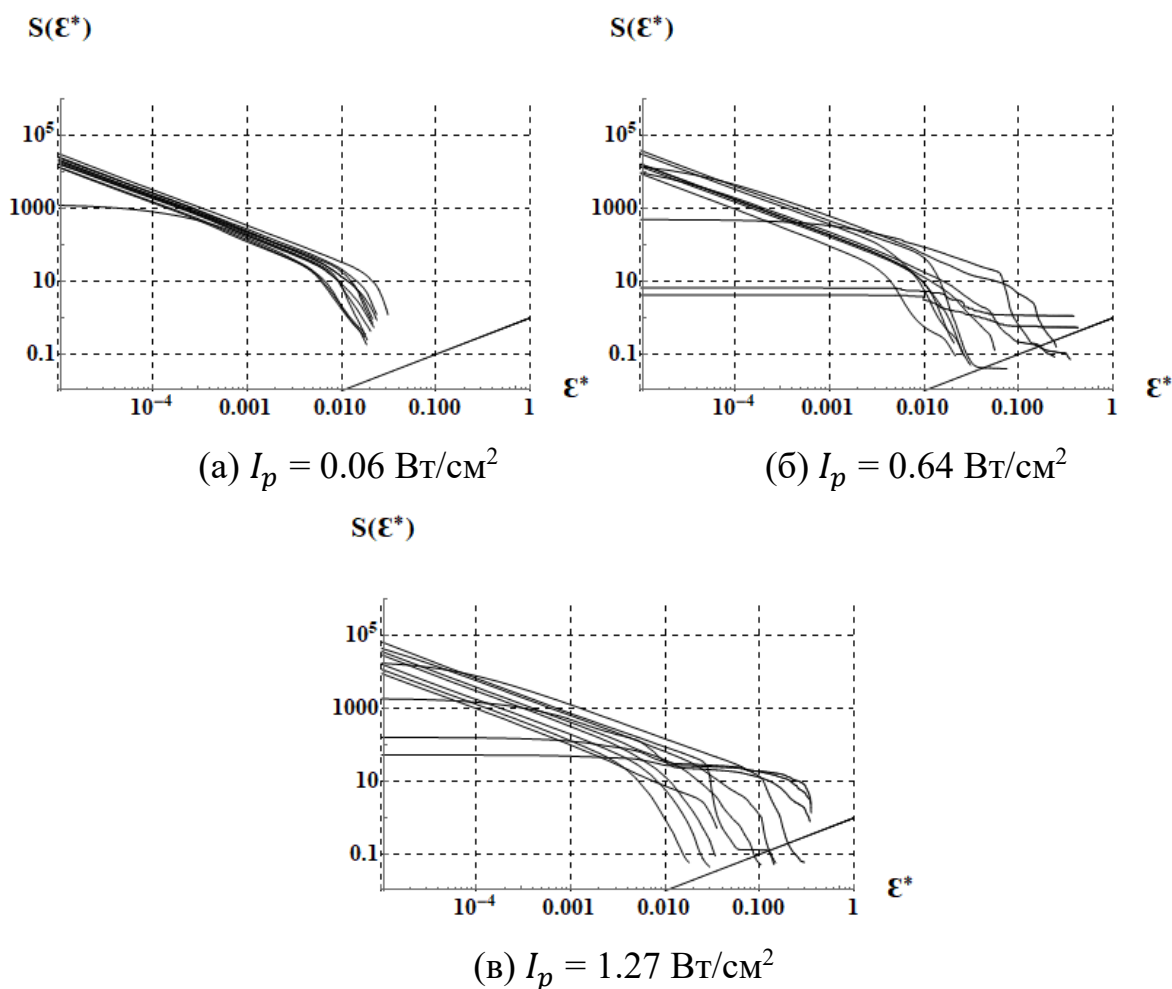


Рисунок 4.7 Зависимости динамической энтропии от нормированного параметра огрубления для каждой частицы в квазиодномерной структуре из МФ частиц в медной оболочке при различной интенсивности лазерного излучения I_p .

Видно, что 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 (рисунок 4.8). 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.

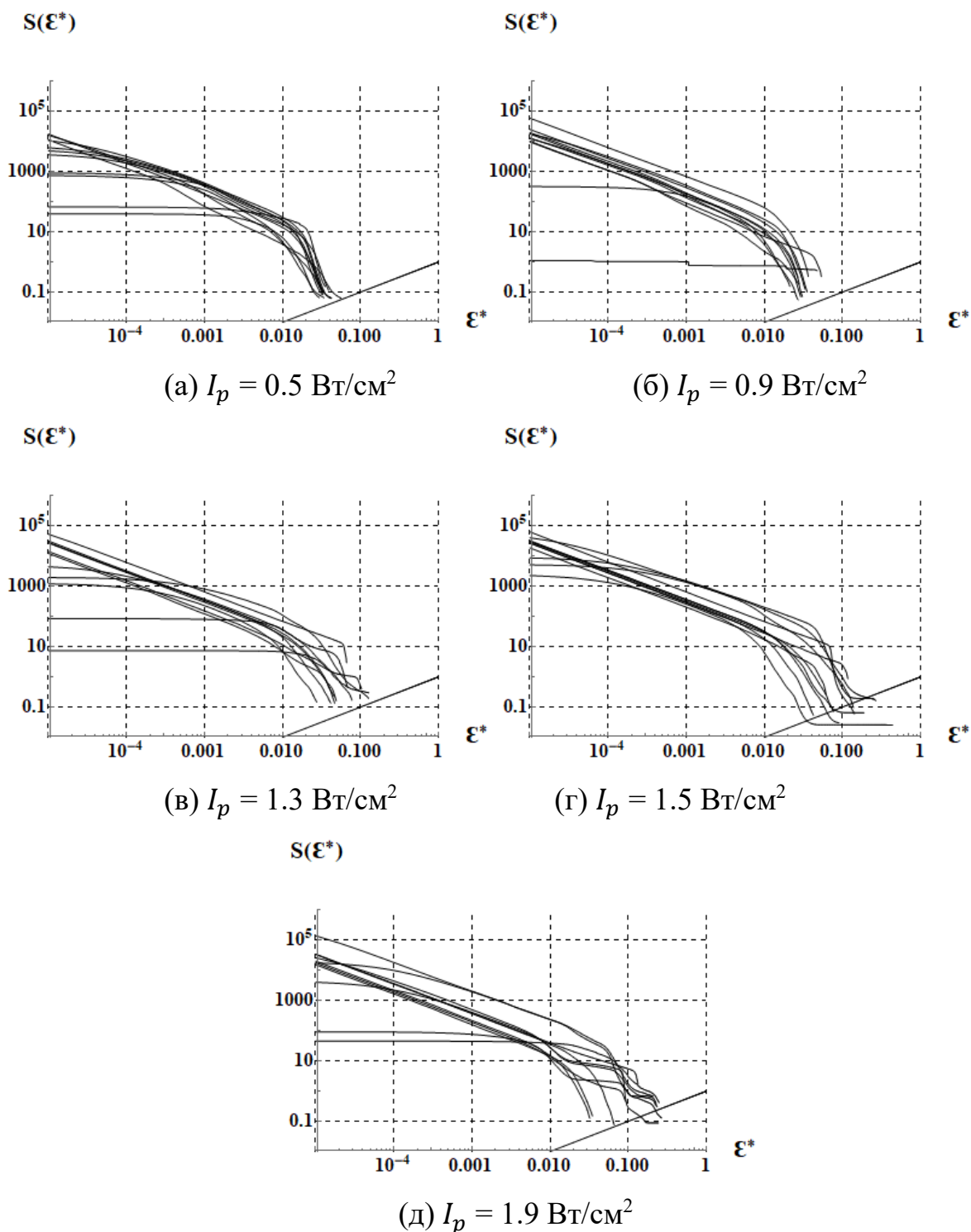


Рисунок 4.8 Зависимости динамической энтропии от нормированного параметра огрубления для каждой янус-частицы в цепочечной системе при различной интенсивности лазерного излучения I_p .

Также сглаживается излом при значении $\varepsilon^*=0.03$ (рисунок 4.8 (а-в)) при изменении I_p до 1.3 Вт/см^2 , после чего вновь появляется (рисунок 4.8 (г)), что может говорить о структурном фазовом переходе.

Для описания различия между пассивным броуновским движением и активным броуновским движением, следуя [11], нужно рассмотреть среднюю длину траектории движения частицы по ансамблю, заданную начальным положением и ориентацией движения в момент времени $t = 0$, т.е. $x(0) = y(0) = 0$, где (x, y) - положение частицы. Для пассивного броуновского движения в силу симметричности это усреднение равно 0, то есть $\langle x(t) \rangle = \langle y(t) \rangle = 0$, где $\langle \dots \rangle$ - среднее по ансамблю. Если рассматривать активное движение частиц, то можно ожидать, что в результате усреднения будет получена прямая линия вдоль направления x , определяемого данной начальной ориентацией, при этом $\langle y(t) \rangle = 0$ из-за симметрии [11]. Это означает, что в среднем активная броуновская частица будет двигаться в направлении своей начальной ориентации на некоторой конечной длине L (т.н. длина персистенции [11]), прежде чем его движение станет случайным.

Для анализа характера броуновского движения частиц в квазиодномерных (цепочечных) структурах построены зависимости 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 (рисунок 4.9 и рисунок 4.10).

Для структуры из МФ частиц в медной оболочке 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 [11], что частицы в цепочечной структуре из покрытых частиц являются активными броуновскими частицами и их активность растет с ростом интенсивности лазерного излучения.

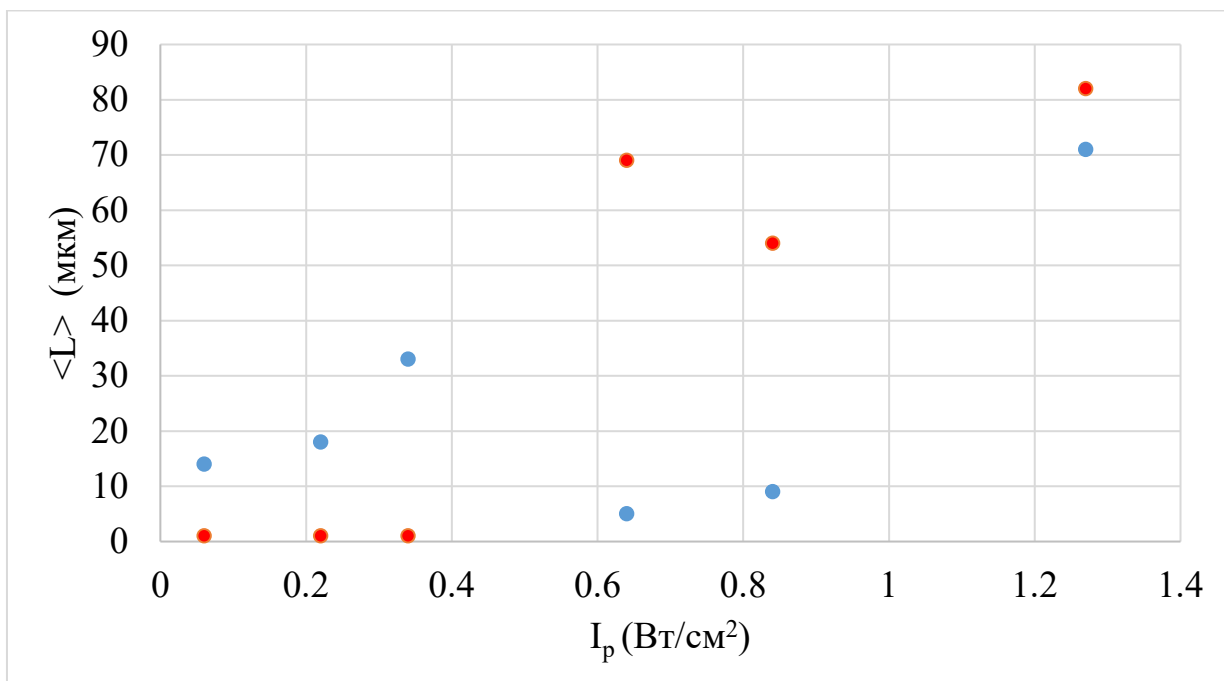


Рисунок 4.9 Изменение среднего линейного смещения $\langle L \rangle$ при движении частиц в цепочечной структуре из МФ частиц в медной оболочке вдоль направления движения (синий) и по нормали к направлению движения (красный), при различных значениях плотности мощности лазерного излучения I_p .

При дальнейшем росте интенсивности лазерного излучения до значений $I_p = 0.84$ Вт/см² наблюдается резкое изменение величин $\langle L \rangle$ вдоль и по нормали к направлению движения частиц, что говорит о движении по замкнутой кругообразной траектории и изменении локализации частиц и кинетическом фазовом переходе. При значении интенсивности лазерного излучения $I_p = 1.27$ Вт/см² значения $\langle L \rangle$ примерно равны, что может быть характерно для диффузного движения в случайном направлении.

Таким образом, для квазиодномерной (цепочечной) структуры, состоящей из МФ частиц в медной оболочке, наблюдались кинетические фазовые переходы при изменении интенсивности лазерного излучения. Также различалось изменялось поведение и степень активности частиц: с ростом интенсивности воздействующего лазерного излучения активность частиц увеличивалась, а характер движения изменялся от коррелирующего с соседями замкнутого в ловушке до независимого от других частиц орбитирующего.

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 (см. рисунок 4.10). Установлено, что при различных значениях W_p общий характер броуновского движения янус-частиц в цепочечной структуре изменяется, от характерного активным броуновским частицам направленного движения ($W_p = 0.05, 0.09, 0.19$ Вт/см²) до диффузионного ($W_p = 0.07, 0.13, 0.15$ Вт/см²) и вращательного по замкнутым траекториям ($W_p = 0.54$ 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.

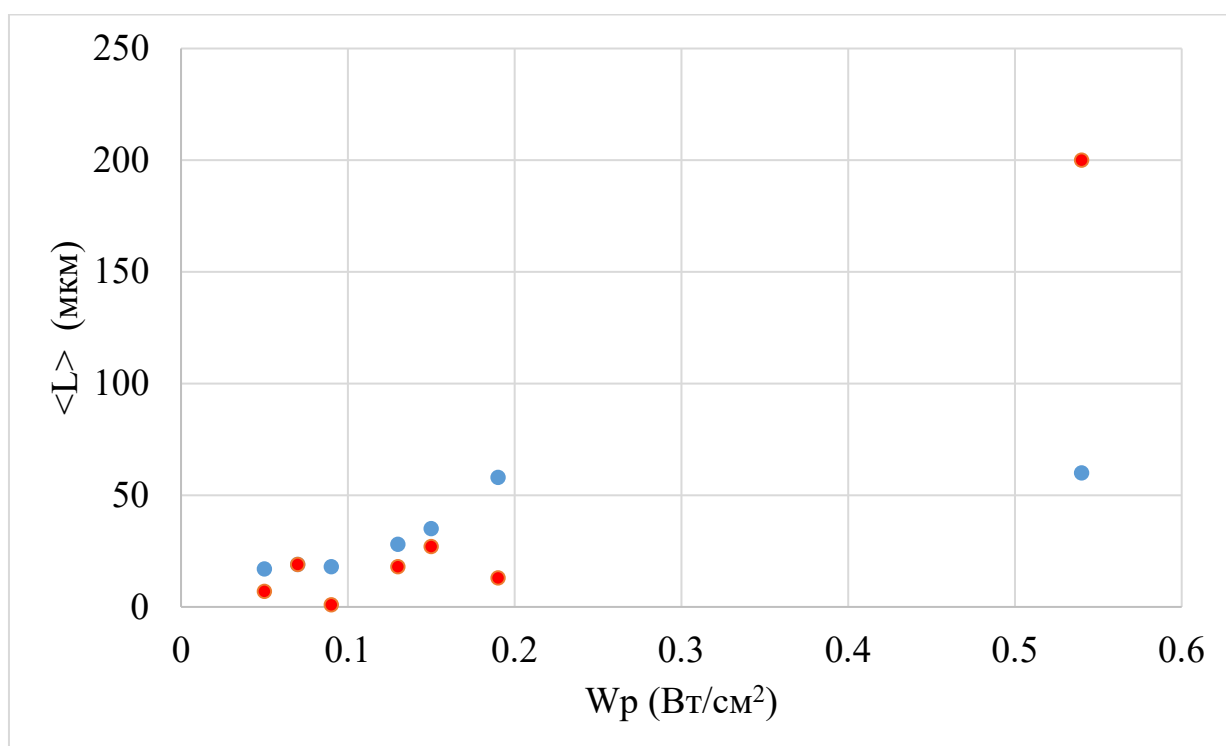


Рисунок 4.10 Изменение среднего линейного смещения $\langle L \rangle$ при движении янус-частиц в нитевидной структуре вдоль направления движения (синий) и по

нормали к направлению движения (красный), при различных значениях плотности мощности лазерного излучения W_p .

Таким образом, для квазиодномерной структуры, состоящей из янус-частиц с анизотропией свойств и материалов поверхности, наблюдались кинетические и структурные «кристалл-жидкость» фазовые переходы при изменении интенсивности воздействующего лазерного излучения. Также различалось поведение и степень активности частиц: с ростом интенсивности воздействующего лазерного излучения активность частиц увеличивалась нелинейно, а характер движения изменялся от коррелирующего с соседями замкнутого в ловушке до независимого от других частиц орбитирующего или вихревого и диффузионного вдоль оси структуры.

4.4 Заключение и выводы по Главе 4

Экспериментально исследован характер движения МФ частиц в квазиодномерных (цепочечных) структурах в объёме нижней страты тлеющего разряда постоянного тока под действием лазерного излучения. Исследовались структуры из МФ частиц в медной оболочке и из янус-частиц. Все частицы имели одинаковые размеры ($D \approx 5$ мкм). Эксперименты выполнены при одинаковых параметрах разряда.

Представлены результаты анализа траекторий, зависимостей среднеквадратичных смещений частиц от времени, распределения скоростей частиц в радиальном и вертикальном направлениях, распределение средней кинетической энергии частиц, формирующих структуру, динамическая энтропия, и среднее линейное смещение частиц.

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

Структура из МФ частиц в медной оболочке на протяжении всего эксперимента сохраняла свою целостность, частицы не меняли своё положение и не покидали ловушку. МФ частицы в медной оболочке движутся в основном в радиальном направлении, увеличивая «диаметр» (крайние положения от центра) вращения.

Положение янус-частиц в структуре менялось при изменении интенсивности лазерного излучения, а также они покидали ловушку стратифицированного тлеющего разряда. Структура из янус-частиц показала себя как более активная и неравновесная по сравнению со структурой из МФ частиц в медной оболочке. Это обусловлено анизотропией свойств янус-частиц, т.к. их поверхность покрыта медью лишь на половину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В **заключении** приведены основные результаты исследований и сделаны общие выводы, 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 среднеквадратичное 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 немонотонным.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы к **введению**

1. Wei, Q., Wang, X., & Zhang, W. (2019). Brownian motion of active particles in a dc glow discharge plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(15), 155203.
2. Ma, X., Li, Y., & Sun, J. (2019). Active Brownian motion of gold nanoparticles in a dc glow discharge plasma. *Journal of Applied Physics*, 126(5), 054301.

Список литературы к **главе 1**

1. Feynman, R. *The Brownian Movement. The Feynman Lectures of Physics, Volume I*, A member of the Perseus book group, New York, 1964.
2. Einstein, A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik* 1905, 322 (8), 549.
3. I. Prigogine, *Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles* // Acad. Roy. Belg. Bull. Cl. Sc., V. 31, pp. 600, 1945.
4. И. Пригожин, *Введение в термодинамику необратимых процессов* // М.: ИЛ, стр. 150, 1960.
5. Г. Николис, И. Пригожин, *Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации* // М.: Мир, стр. 512, 1979.
6. П. Гленсдорф, И. Пригожин, *Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций*// М: Изд-во Мир, 1973. стр. 500, 1973.
7. Н. Ю. Климонтович, *Без формул о синергетике* // М., стр. 104, 1986.
8. Г. Николис, И. Пригожин, *Познание сложного* // М.: Мир, стр. 358, 1990.
9. И. Пригожин, И. Стенгерс, *Время. Хаос. Квант* // М.: Прогресс, стр. 266, 1994.
10. И. Пригожин, *Конец определенности* // Ижевск: РХД, стр. 216, 2001.
11. И. Пригожин, *Определено ли будущее* // Ижевск: ИКИ, стр. 240, 2005.
12. И. Пригожин, *Философия нестабильности* // Вопросы философии, № 6, стр. 46-52, 1991.

13. Aranson, I. S. Active colloids. *UFN* 2013, 183:1, 87–102; *Phys. Usp.* 2013, 56:1, 79–92.
14. Bechinger, C.; DiLeonardo, R.; Löwen, H.; Reichhardt, C.; Volpe, G. Active particles in complex and crowded environments. *Rev. Mod. Phys.* 2016, 88, 045006.
15. Selmeçzi et al., D. *EPJ ST.* 2008, 157, 1–15.
16. Berg, H.C. *E. coli in motion*. Springer Science & Business Media 2008, pp. 134.
17. Cates, M.E. Diffusive transport without detailed balance in motile bacteria: does microbiology need statistical physics. *Rep. Prog. Phys.* 2012, 75, 042601.
18. Sanchez, S.; Ananth, A. N.; Fomin, V. M. Superfast motion of catalytic microjet engines at physiological temperature. *J. Am. Chem. Soc.* 2011, 133, 14860–14863.
19. Paxton, W.F.; Kistler, K.C.; Olmeda, C.C. Catalytic nanomotors: autonomous movement of striped nanorods. *J. Am. Chem. Soc.* 2004, 126, 13424–13431.
20. Howse, J. R.; Jones, R.A.; Ryan, A.J.; Gough, T.; Vafabakhsh, R.; Golestanian, R. Self-Motile colloidal particles: from directed propulsion to randomwalk. *Phys. Rev. Lett.* 2007, 99, 048102.
21. Li, J.; Singh, V.V.; Sattayasamitsathit, S. Water-driven micromotors for rapid photocatalytic degradation of biological and chemical warfare agents. *ACS Nano* 2014, 8, 11118–11125.
22. Kichatov, B.; Korshunov, A.; Sudakov, V.; Gubernov, V.; Kolobov, A.; Korshunova, E.; Kiverin, A. Oscillating motion of oil droplets in the emulsion near the air–water interface. *J. Phys. Chem. B* 2021, 125, 36, 10373.
23. Kichatov, B.; Korshunov, A.; Sudakov, Petrov, O.; V.; Gubernov, V.; Korshunova, E.; Kolobov, A.; Kiverin, A. Magnetic nanomotors in emulsions for locomotion of microdroplets. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2022, 14, 8, 10976.
24. Nosenko, V.; Luoni, F.; Kaouk, A.; Rubin-Zuzic, M.; Thomas, H. Active Janus particles in a complex plasma. *Phys. Rev. Res.* 2020, 2, 033226.
25. Arkar, K.; Vasiliev, M.M.; Petrov, O.F.; Kononov, E.A.; Trukhachev, F.M. Dynamics of active Brownian particles in plasma. *Molecules* 2021, 26, 561.

26. Fairushin, I.I.; Vasiliev, M.M.; Petrov, O.F. Effect of laser radiation on the dynamics of active Brownian macroparticles in an extended plasma-dust monolayer. *Molecules* 2021, 26, 6974.
27. Koss, X.G.; Kononov, E.A.; Lisina, I.I.; Vasiliev, M.M.; Petrov, O.F. Dynamic entropy of two-dimensional active Brownian systems in colloidal plasmas. *Molecules* 2022, 27, 1614.
28. Petrov, O.F.; Statsenko, K.B.; Vasiliev, M.M. Active Brownian motion of strongly coupled charged grains driven by laser radiation in plasma. *Scientific Reports* 2022, 12, 8618.
29. E. Lauga, T.R. Powers. "The hydrodynamics of swimming microorganisms." *Reports on Progress in Physics*, 72(9), 096601 (2009).
30. T. Ishikawa, M. J. Simmonds, Y. C. Pedley. "Hydrodynamic interaction of two swimming model micro-organisms." *Journal of Fluid Mechanics*, 568, 119-160 (2006).
31. D. Kasyap, R. Ganapathy, I. S. Aranson, K. S. Vishnubhatla. "Collective behavior of active colloids with microscale engines." *Physical Review E*, 93(2), 022607 (2016).
32. S. N. Ghosh, S. M. Reza, G. M. Muddassir, S. Banerjee, S. Ghosh, A. Pal, S. Ghosh. "Brownian Motion in Biology." *Journal of Bionanoscience*, 12(3), 206-218 (2018).
33. C. Maggi, U. Marini Bettolo Marconi, A. Puglisi. "Active Brownian particles with energy-depletion-driven speed control." *Physical Review Letters*, 119(3), 038001 (2017).
34. Elgeti, J., et al. (2015). *Physics of Microswimmers - Single Particle Motion and Collective Behavior: A Review*. *Reports on Progress in Physics*, 78(5), 056601.
35. Romanczuk, P., et al. (2012). *Active Brownian Particles: From Individual to Collective Stochastic Dynamics*. *European Physical Journal Special Topics*, 202(1), 1-162.
36. Romanczuk P., Bär M., Ebeling W. et al. «Active Brownian particles» // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* – 2012. – Vol. 202. – P. 1–162.

37. Joanny J. F., Jülicher F., Prost J. «Motion of an Adhesive Gel in a Swelling Gradient: A Mechanism for Cell Locomotion» // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – Vol. 90. – P. 168102.
38. Howard J. *Mechanics of Motor Proteins and the Cytoskeleton*. Sunderland, MA, USA : Sinauer Associates, 2001.
39. M.E. Cates, Diffusive transport without detailed balance in motile bacteria: does microbiology need statistical physics? // *Rep. Prog. Phys*, V. 75, pp. 042601, 2012.
40. "A Brief Account of Microscopical Observations Made in the Months of June, July, and August 1827, on the Particles Contained in the Pollen of Plants; and on the General Existence of Active Molecules in Organic and Inorganic Bodies".
41. Kroy, K., Cichos, F. (2018). Hot Brownian Motion. In: Bunde, A., Caro, J., Kärger, J., Vogl, G. (eds) *Diffusive Spreading in Nature, Technology and Society*. Springer, Cham.
42. H.-R. Jiang, N. Yoshinaga, M. Sano, *Phys. Rev. Lett.* 105, 268302 (2010).
43. K. Kroy, D. Chakraborty, F. Cichos, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 225, 2207 (2016), T. Bickel, A. Majee, A. Würger, *Phys. Rev. E* 88, 012301 (2013).
44. W.C.K. Poon, in *Physics of Complex Colloids*, Vol. 184 of *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, ed. by F.S.C. Bechinger, P. Ziherl (IOS, SIF, Amsterdam, Bologna, 2013), p. 317.
45. I. Llopis, I. Pagonabarraga, *J. Non-Newton, Fluid Mech.* 165, 946 (2010).
46. Snezhko A., Belkin M., Aranson I. S., Kwok W. K. «Self-Assembled Magnetic Surface Swimmers» // *Phys. Rev. Lett.* – 2009. – Vol. 102. – P. 118103.
47. Berg, H.C. (2003). "The rotary motor of bacterial flagella." *Annu. Rev. Biochem.* 72:19-54.
48. Lauffenburger, D.A. и Horwitz, A.F. (1996). "Cell migration: A physically integrated molecular process." *Cell.* 84(3):359-369.
49. Berg, H.C. (2000). "Motile behavior of bacteria." *Physics Today.* 53(1):24-29.
50. Bechinger, M. et al. Active Brownian particles with magnetic dipole moments. *Phys. Rev. Lett.* 2006, 97, 138301.

51. Sapozhnikov M. V., Tolmachev Y. V., Aranson I. S., Kwok W. K. «Dynamic Self-Assembly and Patterns in Electrostatically Driven Granular Media» // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – Vol. 90. – P. 114301.
52. Sapozhnikov M. V., Aranson I. S., Tolmachev Y. V., Kwok W. K. «Self-Assembly and Vortices Formed by Microparticles in Weak Electrolytes» // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 93. – P. 084502.
53. Schaller, V. et al. Polar order in suspensions of motile colloids. *Phys. Rev. Lett.* 2010, 105, 045005.
54. Lohse, D.S. et al. Magnetoelectric colloidal chains. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2014, 111, 17402-17407.
55. Jiang H.-R., Yoshinaga N., Sano M. «Active Motion of a Janus Particle by Self-Thermophoresis in a Defocused Laser Beam» // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – Vol. 105. – P. 268302.
56. Sagot B. «Thermophoresis for spherical particles» // *Journal of Aerosol Science.* – 2013. – Vol. 65. – P. 10–20.
57. Uspal W. E. «Theory of light-activated catalytic Janus particles» // *J. Chem. Phys.* – 2019. – Vol. 150(11) – P. 114903.
58. A. P. Solon, M. E. Cates, J. Tailleur Active Brownian particles and run-and-tumble particles: A comparative study. *Eur. Phys. J. Special Topics* 224, 1231-1262 (2015).
59. Yaouen Fily, Aparna Baskaran, Michael F. Hagan (2016). Active Particles on Curved Surfaces, arXiv (2016). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1601>.
60. Marchetti, M.C., et al. (2013). "Hydrodynamics of soft active matter." *Rev. Mod. Phys.* 85:1143-1189.
61. Ivo Buttinoni, Julian Bialké, Felix Kümmel, Hartmut Löwen, Clemens Bechinger, Thomas Speck. (2010). Dynamical clustering and phase separation in suspensions of self-propelled colloidal particles. *Physical Review Letters*, 105(2), 02800.
62. I. Langmuir, G Found, A. F. Dittmer, A new type of electric discharge: the streamer discharge // *Science*, V. 60, No. 1557, pp. 392-394, 1924.

63. Fortov V. E., Morfill G. E. *Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space*, 1st ed. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2009.
64. Petrov O. F., Vasiliev M. M., Vaulina O. S. et al. «Solid-hexatic-liquid transition in a two-dimensional system of charged dust particles» // *EPL*. – 2015. – Vol. 111. – P. 45002.
65. Косс К. Г., Петров О. Ф., Мясников М. И. и др., «Фазовые переходы и динамическая энтропия в малых двумерных системах: эксперимент и численное моделирование» // *ЖЭТФ*. – 2016. – Т. 150. – С. 111-121
66. J. Zhang, E. Luijten, B. A. Grzybowski et al, Active colloids with collective mobility status and research opportunities // *Chem. Soc. Rev.*, V.46, pp. 5551-5569, 2017.
67. J. D. Williams, E. Thomas, Initial measurement of the kinetic dust temperature of a weakly coupled dusty plasma // *Phys. Plasmas*, V. 13, pp. 063509, 2006.
68. J. D. Williams, E. Thomas, Measurement of the kinetic dust temperature of a weakly coupled dusty plasma // *Phys. Plasmas*, V. 14, pp. 063702, 2007.
69. S. Nunomura, S. Zhdanov, D. Samsonov et al, Wave Spectra in Solid and Liquid Complex (Dusty) Plasmas // *Phys. Rev. Lett.*, V. 94, pp. 045001, 2005.
70. G. E. Morfill, *Plasma Crystal* // Preprint Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics ,Germany: Garching, 1994.
71. P. K. Shukla and A. A. Mamun, *Introduction to Dusty Plasma Physics* // (Bristol: Institute of Physics Publishing), 2002.
72. В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак и др, Пылевая плазма // *УФН* 174 495–544, 2004.
73. E.A. Sametov, E.A. Lisin, E.A. Kononov, K. Arkar et al., Effective symmetry breaking of interparticle interaction in chain structures of microparticles in a gas discharge plasma // *Book of abstracts 17th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas*. pp. 47-48. 2021.
74. E. Lisin., E. Kononov., E. Sametov., Arkar K. et al., Experimental study of the wakefield a dust particle in a dc discharge of the gas mixture // *Book of abstracts*

of a Nature Conference «Advances and Applications in Plasma Physics». pp. 114. 2019.

75. Wei, Q., Wang, X., & Zhang, W. (2019). Brownian motion of active particles in a dc glow discharge plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(15), 155203.

76. Ma, X., Li, Y., & Sun, J. (2019). Active Brownian motion of gold nanoparticles in a dc glow discharge plasma. *Journal of Applied Physics*, 126(5), 054301.

Список литературы к главе 2

1. Boltnev R. E., Kononov E. A., Trukhachev F. M., Vasiliev M. M., Petrov O. F. «Synthesis of nanoclusters and quasy one-dimensional structures in glow discharge at $T \approx 2$ K» // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2020. – Vol. 29. – P. 085004.
2. Boltnev R. E., Vasiliev M. M., Kononov E. A., Petrov O. F. «Formation of solid helical filaments at temperatures of superfluid helium as self-organization phenomena in ultracold dusty plasma» // *Scientific Reports*. – 2019. – V. 9. – P. 3261.
3. Болтнев Р. Е., Васильев М. М., Кононов Е. А., Петров О. Ф., «Явления самоорганизации в криогенной газоразрядной плазме: формирование пылевого облака наночастиц и плазменно-пылевых волн» // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. – 2018. – Т. 153(4). – С. 671–676.
4. 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.
5. 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.

Список литературы к главе 3

1. Arkar, K.; Vasiliev, M.M.; Petrov, O.F.; Kononov, E.A.; Trukhachev, F.M. Dynamics of active Brownian particles in plasma. *Molecules* 2021, 26, 561.
2. Petrov, O.F.; Statsenko, K.B.; Vasiliev, M.M. Active Brownian motion of strongly coupled charged grains driven by laser radiation in plasma. *Scientific Reports* 2022, 12, 8618.
3. Kononov, E.A.; Vasiliev, M.M.; Vasilieva, E.V.; Petrov, O.F. Particle surface modification in the near-electrode region of an RF discharge. *Nanomaterials* 2021, 11, 2931.
4. Shukla, P.K.; Mamun, A.A. Introduction to dusty plasma physics. *Plasma Phys. Control. Fusion* 2002, 44, 395.
5. Allen, J.E. Probe theory—the orbital motion approach. *Phys. Scr.* 1992, 45, 497
6. Eymeren, J.; Wurm, G. The implications of particle rotation on the effect of photophoresis. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2012, 420, 183.
7. Vasiliev, M.M.; Petrov, O.F.; Alekseevskaya, A.A.; Ivanov, A.S.; Vasilieva, E.V. Dynamic effects of laser action on quasi-two-dimensional dusty plasma systems of charged particles. *Molecules* 2020, 25(15), 3375.
8. Qian, H.; Sheetz, M.P.; Elson, E.L. Single particle tracking. Analysis of diffusion and flow in two-dimensional systems. *Biophys. J.* 1991, 60, 910.
9. Golubovski, Yu.V.; ŽNisimov, S. *U. Zh. Tekh. Fiz.* 1995, 65, 46. (Tech. Phys. 1995, 40, 24).
10. O. S. Vaulina, I. I. Lisina, E. A. Lisin; Influence of different kinetic heating mechanisms on the dynamics of a trapped Brownian particle in a complex plasma. *Physics of Plasmas* 1 November 2022; 29 (11): 113703.

Список литературы к главе 4

1. О.С. Ваулина, Э.А. Саметов, Е.А. Лисин, Спектральные характеристики заряженных частиц в ограниченных цепочечных структурах, *ЖЭТФ*, (2020), **158**, № 2, сс. 399-412.

2. I.I. Lisina, E.A. Lisin, O.S. Vulina, O.F. Petrov. Coupling of dust particles in a weakly collisional plasma with an ion flow. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1147**, 012112, (2019).
3. I.I. Lisina, O.S. Vulina, Formation of chain-like structures of dust particles with anisotropic pair interaction. *Phys. Scr.* **89**, 105604, (2014).
4. Allen, J.E. Probe theory—the orbital motion approach. *Phys. Scr.* 1992, 45, 497.
5. Arkar, K.; Vasiliev, M.M.; Petrov, O.F.; Kononov, E.A.; Trukhachev, F.M. Dynamics of active Brownian particles in plasma. *Molecules* 2021, 26, 561.
6. Eymeren, J.; Wurm, G. The implications of particle rotation on the effect of photophoresis. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2012, 420, 183.
7. M. Lampe, G. Joyce, G. Ganguli, V. Gavrishchaka, [2000], “Interactions between dust grains in a dusty plasma”, *Phys. Plasmas*, 7, 3851.
8. I.H. Hutchinson, Intergrain forces in low-Mach-number plasma wakes. *Physical Review E*, **85**, 066409, (2012).
9. Fairushin, I.I.; Vasiliev, M.M.; Petrov, O.F. Effect of laser radiation on the dynamics of active Brownian macroparticles in an extended plasma-dust monolayer. *Molecules* 2021, 26, 6974.
10. Löwen, H. Twenty years of confined colloids: From confinement-induced freezing to giant breathing. *J. Phys. Condens. Matter* 2009, 21, 474203
11. Bechinger, C.; DiLeonardo, R.; Löwen, H.; Reichhardt, C.; Volpe, G. Active particles in complex and crowded environments. *Rev. Mod. Phys.* 2016, 88, 045006.
12. Koss, K.G., Petrov, O.F., Myasnikov, M.I. et al. Phase transitions and dynamic entropy in small two-dimensional systems: Experiment and numerical simulation. *J. Exp. Theor. Phys.* 123, 98–107 (2016).
13. P. Allegrini, J. F. Douglas, and S. C. Glotzer, *PRE* 60, 5714 (1999).
14. P. Gaspard and X.-J. Wang, *Phys. Rep.* 235, 291 (1993).