

На правах рукописи

Саметов Эдуард Александрович

**Спектральная плотность случайных процессов и
межчастичное взаимодействие в комплексной плазме**

1.3.9 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

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

Научный руководитель: **Лисин Евгений Александрович**
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией диагностики пылевой плазмы ФГБУН
Объединенный институт высоких температур РАН.

**Официальные
оппоненты:** **Игнатов Александр Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор, главный
научный сотрудник ФГБУН ФИЦ «Институт общей физики им.
А.М. Прохорова Российской академии наук»
Павлов Сергей Иванович
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей
физики I Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-
Петербургского государственного университета»

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный центр
Российской Федерации Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований»

Защита состоится «___» декабря 2023 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки ОИВТ РАН: <https://jiht.ru/>.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н.

Тимофеев А.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Пылевая (комплексная) плазма представляет собой ионизированный газ, в котором присутствуют заряженные макроскопические частицы микронных размеров [1–5]. Эти пылевые частицы могут приобретать значительные электрические заряды (порядка 10^2 – 10^5 элементарных зарядов), как положительные, так и отрицательные, в зависимости от процессов зарядки, происходящих в плазме. Электростатическое взаимодействие между заряженными частицами зависит от произведения их зарядов, поэтому неидеальность в подсистеме пылевых частиц реализуется значительно легче, чем в подсистеме электронов и ионов, несмотря на значительно меньшую концентрацию микрочастиц. Следствием этого является возможность самоорганизации пылевых частиц в различные упорядоченные структуры. Большинство лабораторных исследований пылевых структур проводятся в слабоионизованных газовых разрядах, где столкновения между пылевыми частицами и нейтралами окружающего газа могут оказывать существенное воздействие на их динамику и процессы формирования структур. Воздействие внешних сил и межчастичных взаимодействий в сочетании с диссипацией в такой плазме может привести к образованию разнообразных структур, включая квазистационарные плазменно-пылевые структуры подобные жидкости или твердому телу, также к колебательным или хаотическим режимам [1,4,6–8]. В некоторых условиях пылевые частицы могут приобретать стохастические кинетические энергии, значительно превышающие температуру окружающего газа [9–11].

Первые экспериментальные исследования формирования упорядоченных структур заряженных микрочастиц были проведены в 1959 году с использованием модифицированной ловушки Пауля [12]. Возможность формирования кристаллических структур в плазме, содержащей пылевые частицы, была проанализирована Икези в 1986 году [13]. Вскоре после этого впервые экспериментально наблюдался пылевой кристалл в плазме емкостного высокочастотного разряда [14–17]. Позднее такие структуры были обнаружены в тлеющем разряде постоянного тока [18–20], термической плазме при атмосферном давлении и фотоиндуцированной плазме [21–23], а также в ядерно-возбуждаемой плазме при применении различных методов ее индукции [24]. Эксперименты с пылевой плазмой в емкостных высокочастотных разрядах показали разнообразие монослойных и многослойных пылевых структур с разной упаковкой в расположении частиц [1,4,25]. В экспериментах с плазмой индукционного ВЧ разряда и с плазмой тлеющего разряда постоянного тока образовывались отдельные пылевые цепочки, состоящие из нескольких десятков частиц [26,27]. Следует отметить, что конкретная форма пылевой структуры в плазме зависит от различных факторов, включая пространственную неоднородность плазмы, конфигурацию внешних электромагнитных

полей и анизотропию потенциала взаимодействия между микрочастицами. Анизотропия взаимодействия может происходить как из-за анизотропии плазмы, так и из-за асимметрии формы микрочастиц и неоднородного распределения заряда по их поверхности. В случае анизотропного взаимодействия, плазменно-пылевые системы могут принимать различные состояния, включая кристаллические, жидкостные и другие фазы с разными степенями ориентационного и позиционного упорядочения.

Важно подчеркнуть, что исследование характеристик пылевой плазмы представляет самостоятельный интерес в силу широкого распространения этого типа плазмы в космическом пространстве. Заряженные пылевые частицы присутствуют в различных космических средах, таких как межзвездные и межпланетные облака, хвосты комет, планетарные кольца и верхние слои атмосферы [5,28–31]. Пылевая плазма также обнаружена вблизи поверхности Луны и других атмосферических объектах в космосе, включая искусственные спутники Земли [32–34]. Пылевые частицы также играют важную роль в различных технологических процессах, связанных с использованием плазмы. Они находят применение в материаловедении, например, при производстве порошков с уникальными свойствами и создании наноструктурных материалов, включая тонкие пленки с включением наночастиц [35,36]. Также они находят применение в микроэлектронике, где используются в процессах плазменного осаждения и травления [37], в сфере энергетики, связанной с разработкой установок для термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы [38,39], и при создании перспективных компактных фотогальванических источников электроэнергии [40,41].

Взаимодействие между микрочастицами обуславливает самоорганизацию, массоперенос, подкачку и перераспределение энергии, а также неравновесные фазовые переходы в пылевой компоненте комплексной плазмы. Несмотря на существование ряда методик для изучения взаимодействия, вопрос о силах межчастичного взаимодействия в эксперименте остается открытым. Отметим также, что ранее проводились измерения спектральной плотности колебаний пылевых частиц в газоразрядной плазме, однако спектральный анализ ограничивался только качественными характеристиками в виду отсутствия соответствующей теории, в особенности позволяющей учитывать нарушения симметрии эффективного взаимодействия. Таким образом, актуальность данной работы во многом обусловлена необходимостью создания эффективного метода диагностики межчастичного взаимодействия и проведения детального экспериментального исследования сил, действующих на пылевые частицы в комплексной плазме.

Степень разработанности темы исследования.

С тех пор, как были проведены первые эксперименты с лабораторной пылевой плазмой, были опубликованы тысячи исследований по теоретическому развитию этой темы. Несмотря на

такую богатую теоретическую базу, одной из важных нерешенных проблем в пылевой плазме остается прямое экспериментальное определение действующих сил, в частности межчастичного взаимодействия и конфайнмента. Существующие же методики, основанные на внешних возмущениях, и бесконтактные методы имеют серьезные ограничения в применении.

В частности, контактные методы требуют специальной модификации экспериментальной установки, предварительных измерений внешних сил, действующих на частицы, и/или предварительной информации о параметрах плазменной среды и потенциале межчастичного взаимодействия [42–44]. Внешнее возмущение системы частиц является распространенным подходом к исследованию несимметричных взаимодействий в пылевой плазме. Это могут быть лазерные воздействия [44–48], низкочастотные модуляции смещения электрода [42] или использование гравитационного динамического зонда [49]. Анализ динамического отклика частиц на внешнее возмущение позволяет определить силы взаимодействия между одной парой частиц [45,46,49] и оценить, является ли взаимодействие в системе многих частиц невзаимным [44]. Помимо упомянутых выше требований, внешние возмущения могут приводить к заметным изменениям исследуемой системы.

В работах [50,51] был предложен невозмущающий метод, основанный на решении обратной задачи Ланжевена для слабо демпфированных систем. Этот метод показал хорошие результаты при измерении сил взаимодействия между частицами в квазидвумерном монослое микрочастиц, взвешенных в приэлектродной области ВЧ разряда. Однако данный метод крайне чувствителен к экспериментальным ошибкам определения последовательных положений частиц в пространстве, которые используются для вычисления ускорений частиц [52].

В работе [53] был предложен бесконтактный метод, основанный на определении собственных частот с помощью системы уравнений для двух связанных осцилляторов. Однако, этот метод не учитывает диссипативные и случайные процессы, действующие в системе, что может приводить к значительной ошибке в определении характерных частот даже в слабодиссипативных системах с невзаимным взаимодействием [54].

В работе [54] был предложен корреляционный подход к изучению невзаимных эффективных взаимодействий пылевых броуновских частиц в плазме. Этот подход учитывает диссипативные и случайные процессы. Однако, он может давать некорректные результаты для систем, спектры которых имеют какие-либо артефакты обработки или «паразитные» моды.

Подробную информацию об особенностях движения заряженных частиц можно получить также путем анализа спектральной плотности и характерных частот колебаний. В отличие от других характеристик системы информация о спектральной плотности тепловых колебаний частиц позволяет анализировать их температуру, коэффициенты трения и полный спектр частот их собственных колебаний в исследуемых системах. Это, в свою очередь, дает возможность

определить характер и тип потенциала взаимодействия между частицами. В настоящее время спектральная плотность в системах пылевых частиц использовалась только для качественного анализа. Так, в работах [55–57] анализировались спектры колебаний, полученные в ходе численного моделирования для монослоя пылевых частиц, в работе [58] сравнивались спектры колебаний пары микрочастиц в ВЧ разряде в случае горизонтальной и вертикальной конфигураций частиц. Также ранее для систем взаимодействующих частиц (в том числе с несимметричным межчастичным взаимодействием) были получены собственные частоты колебаний и определены условия, при которых колебания устойчивы [59,60]. Однако аналитические выражения для спектров колебаний взаимодействующих броуновских частиц в ловушке, которые позволили бы проводить полноценный анализ действующих в системе пылевых частиц сил, пока не были получены.

Цели и задачи диссертационной работы:

1. Аналитическое исследование спектральной плотности случайных процессов в системе связанных осцилляторов. Анализ спектральной плотности колебаний взаимодействующих броуновских частиц, в том числе частных случаев пары частиц, идентичных частиц в ограниченных цепочечных структурах и в малоразмерных квазидвумерных кластерах.

2. Проверка полученных аналитических выражений с помощью численного моделирования. Изучение влияния параметров системы на спектральные плотности колебаний в различных системах взаимодействующих броуновских частиц.

3. Разработка спектрального метода восстановления параметров системы. Проверка работы методики и сравнение с другими методами на результатах численного моделирования

4. Апробация предложенного метода на результатах экспериментов с различными плазменно-пылевыми структурами в высокочастотном газовом разряде и разряде постоянного тока.

5. Анализ действующих сил в цепочечных структурах пылевых частиц. Исследование нарушения симметрии эффективного взаимодействия между пылевыми частицами. Исследование устойчивости вертикальных пар частиц.

6. Анализ динамики ограниченной системы заряженных броуновских частиц, находящихся в постоянном электромагнитном поле. Анализ спектральных характеристик и процессов диффузии системы заряженных броуновских частиц в удерживающем силовом поле в присутствии магнитного поля.

Научная новизна.

1. Впервые получены аналитические выражения для спектральной плотности случайных процессов, действующих в обобщенной системе связанных гармонических осцилляторов, в том числе и с учетом нарушения симметрии их взаимодействия.

2. Изучено влияние основных параметров системы заряженных броуновских частиц с несимметричным межчастичным взаимодействием в удерживающем силовом поле (таких как, невзаимность и неидентичность частиц, трение, интенсивность тепловых источников, колебание заряда, число частиц) на спектральную плотность их колебаний.

3. Предложен новый метод бесконтактной диагностики параметров плазменно-пылевой системы, основанный на измерении спектрального отклика пылевой подсистемы на стохастические процессы и позволяющий количественно определять (восстанавливать) производные удельных сил взаимодействия между пылевыми частицами и внешних удерживающих сил, а также коэффициенты трения частиц и интенсивности источников их стохастической энергии. Для работы метода не требуются внешние возмущения системы, специальная модернизация экспериментальной установки, предварительные измерения электрического поля ловушки и размеров частиц, а также предположения о типе парного межчастичного взаимодействия.

4. Проведена проверка работы предложенного экспериментального метода диагностики на результатах численных расчетов. Сравнение с существующими бесконтактными методами показало его значительное преимущество при обработке траекторий частиц с ошибками в определении их положений в пространстве (с конечным пространственным разрешением).

5. Впервые детально изучено нарушение симметрии эффективного взаимодействия двух микрочастиц в приэлектродном слое высокочастотного газового разряда емкостного типа. С помощью метода, основанного на анализе спектральной плотности колебаний частиц, получены зависимости производных сил межчастичного взаимодействия и относительных зарядов частиц от давления буферного газа и мощности разряда. Было обнаружено, что даже небольшие (порядка 0.1–1%) пространственные флуктуации заряда одной частицы, вызванные ее стохастическим движением в кильватерном следе другой частицы, могут привести к значительному изменению измеряемой производной межчастичной силы.

6. Впервые исследовано взаимодействие между пылевыми частицами, образующими вертикально ориентированную цепочку в приэлектродном слое высокочастотного разряда. С помощью метода, основанного на анализе спектральной плотности колебаний частиц, определены производные удельных внешних и межчастичных сил. Обнаружено значительное нарушение симметрии эффективного взаимодействия между всеми парами частиц (ближайших соседей) в цепочке.

7. Выполнена экспериментальная проверка критериев конфигурационной устойчивости системы из двух пылевых частиц в анизотропной плазме. Измерения проводились для частиц, левитирующих в стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока.

8. Впервые количественно исследованы межчастичное взаимодействие и электрическое поле страты в области левитации пылевых частиц в тлеющем разряде. Показан эффект разрядки одной микрочастицы, находящейся в кильватерном следе другой частицы.

9. Получены новые данные о влиянии магнитного поля на транспортные, спектральные и структурные характеристики заряженных броуновских частиц в различных электрических полях. Предложены аналитические соотношения для спектральной плотности смещений частиц и их коэффициентов массопереноса.

10. Подробно рассмотрено влияние тепловых флуктуаций частиц на их движение в постоянном электромагнитном поле. Предложены аналитические оценки для анализа величины эффективного радиуса тепловых флуктуаций частиц. Предложенные соотношения были проверены путем численного моделирования задачи.

Научная и практическая значимость работы.

Научная значимость работы заключается в количественном анализе внешнего удерживающего поля и взаимодействия между пылевыми частицами, образующими цепочечные системы в приэлектродном слое ВЧ разряда и в страте разряда постоянного тока. Были определены производные удельных внешних и межчастичных сил. Зарегистрировано значительное нарушение симметрии эффективного взаимодействия между частицами. Практическая ценность работы заключается в возможности использования предложенной методики восстановления параметров системы специалистами, занимающихся изучением физических свойств пылевой плазмы. Методика применима для систем, состоящих из разносортных частиц, имеющих различные размеры, заряды и кинетические температуры, и с любым типом межчастичного взаимодействия. Описанная методика диагностики также применима для анализа широкого круга дисперсных систем различной природы, в которых возможно экспериментальное измерение спектральной плотности случайных процессов (коллоидные суспензии, биомакромолекулы в растворах).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические выражения для спектральной плотности случайных процессов, действующих в обобщенной системе связанных гармонических осцилляторов, в том числе и с учетом нарушения симметрии их взаимодействия.

2. Новый метод бесконтактной диагностики параметров плазменно-пылевой системы, основанный на анализе спектральной плотности случайных процессов.

3. Результаты экспериментального исследования нарушения симметрии эффективного взаимодействия между микрочастицами, левитирующими в приэлектродном слое высокочастотного газового разряда емкостного типа при различных давлениях буферного газа и мощностях разряда.

4. Экспериментальная проверка критериев конфигурационной устойчивости системы из двух пылевых частиц в условиях тлеющего разряда постоянного тока.

5. Новые данные о влиянии магнитного поля на спектральные, структурные и транспортные характеристики заряженных броуновских частиц в электрических полях различной конфигурации.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных в диссертационной работе аналитических выражений для спектральной плотности случайных процессов, действующих в обобщенной системе связанных гармонических осцилляторов с нарушения симметрии их взаимодействия, подтверждается хорошим согласием с результатами численного моделирования динамики несимметрично взаимодействующих броуновских частиц в ловушке и экспериментами с пылевыми частицами, левитирующими в газовых разрядах. Анализируемые экспериментальные данные были получены с использованием современных экспериментальных средств и методов обработки данных, в том числе методов распознавания частиц и определения их пространственных траекторий, что позволило в том числе обеспечить воспроизводимость результатов. Достоверность результатов анализа экспериментальных данных также подтверждается согласием полученных коэффициентов трения и относительных зарядов частиц с литературными данными. Значимость исследований также подтверждена мировым научным сообществом посредством публикаций в рецензируемых журналах и признания на российских и международных конференциях.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих российских и международных конференциях: Научные конференции МФТИ (Москва, Россия, 2017-2023), International Conferences on Equations of State for Matter (Эльбрус, Россия, 2018, 2020), International Conferences on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Эльбрус, Россия, 2019, 2021), Scientific-Coordination Workshop on Non-Ideal Plasma Physics (Москва, Россия, 2018, 2019), XII конференция «Современные методы диагностики плазмы и их применение» (Москва, Россия, 2020), 17th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas (Дрезден, Германия, 2021), 18th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation (Москва, Россия, 2022), 9th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (Москва, Россия, 2022), X International Conference Plasma Physics and Plasma Technology (Минск, Беларусь, 2022), III Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (Казань, Россия, 2022).

Публикации.

По материалам диссертационной работы опубликовано 39 печатных работ, включая 13 статей в рецензируемых журналах:

Личный вклад автора.

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

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 142 страницы, в том числе 60 рисунков. Список литературы включает 249 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, приведена научная новизна исследований, описана научная и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. Приводятся необходимые для дальнейшего изложения понятия и выражения. Глава состоит из четырех разделов, включая выводы.

В **разделе 1.1** представлена общая информация о комплексной (пылевой) плазме, необходимая для понимания содержания диссертации.

В **разделе 1.2** рассмотрены процессы зарядки и электростатический потенциал микрочастиц в изотропной и анизотропной плазме.

В **разделе 1.3** рассмотрены основные силы, действующие на пылевую частицу в газоразрядной плазме: не связанные с зарядом (термофоретическая сила, сила торможения нейтралами, гравитационная сила), вызванные электрическим зарядом частицы (электростатическая сила и сила ионного увлечения) и взаимодействие между частицами (электростатическое взаимодействие, теневой эффект, связанный с потоками плазмы и нейтральной компоненты).

В **разделе 1.4** представлен обзор существующих методов для анализа межчастичного взаимодействия в пылевой плазме. В обзоре рассмотрены методы, основанные на внешних возмущениях, и бесконтактные методики диагностики.

Вторая глава посвящена аналитическому и численному исследованию спектральных плотностей случайных процессов в системе связанных гармонических осцилляторов, в том числе и с учетом нарушения симметрии их взаимодействия. Глава состоит из четырех частей, включая выводы.

В **разделе 2.1** представлены аналитические выражения спектральной плотности как в общем виде для системы связанных осцилляторов, так и для взаимодействующих броуновских частиц в различных конфигурациях.

В **разделе 2.1.1** приведен вывод спектральной плотности для обобщенной линейной системы с диссипативными силами из N связанных осцилляторов, управляемых случайными процессами. В результате спектральная плотность вынужденных колебаний i -го осциллятора может быть представлена в виде:

$$G_i(\omega) = \sum_{j=1}^N S_j \bar{M}_i(j) + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N S_{ij} \bar{M}_i(j, k), \quad (1)$$

где S_j – это спектральная плотность, характеризующая действующий на j -й осциллятор процесс, S_{ij} – взаимная спектральная плотность соответствующих процессов, $\bar{M}_i(j)$ – квадрат

модуля частотной передаточной функции, связывающую воздействие на j -ую частицу с откликом i -ой частицы, $\bar{M}_i(j, k)$ – функция, связывающая воздействие на j -ую и k -ую частицу с откликом i -ой частицы.

В разделах 2.1.2 и 2.1.3 представлены спектральные плотности для стационарной системы, состоящей из N броуновских частиц, взаимодействующих с любым попарным потенциалом и находящихся в ловушке, в случае колебаний самих частиц и для совместных и относительных колебаний.

В разделе 2.1.4 продемонстрированы аналитические выражения для спектров колебаний системы двух осцилляторов, а также для взаимодействующих броуновских частиц в ловушке, которые имеют вид:

$$G_{1(2)}^{(\gamma)}(\omega) = \frac{\frac{2\nu_{1(2)}T_{1(2)}^{(\gamma)}}{m_{1(2)}} \left[\left(\omega^2 - f_{2(1)}^{(\gamma)} + f_{12(21)}^{(\gamma)} \right)^2 + \nu_{2(1)}^2 \omega^2 \right] + \frac{2\nu_{2(1)}T_{2(1)}^{(\gamma)}}{m_{2(1)}} f_{21(12)}^{(\gamma)2}}{W^{(\gamma)}}, \quad (2)$$

$$G_{+}^{(\gamma)}(\omega) = \frac{\frac{2\nu_1 T_1^{(\gamma)}}{m_1} \left[\left(\omega^2 - f_2^{(\gamma)} + 2f_{12}^{(\gamma)} \right)^2 + \nu_2^2 \omega^2 \right] + \frac{2\nu_2 T_2^{(\gamma)}}{m_2} \left[\left(\omega^2 - f_1^{(\gamma)} + 2f_{21}^{(\gamma)} \right)^2 + \nu_1^2 \omega^2 \right]}{W^{(\gamma)}}, \quad (3)$$

$$G_{-}^{(\gamma)}(\omega) = \frac{\frac{2\nu_1 T_1^{(\gamma)}}{m_1} \left[\left(\omega^2 - f_2^{(\gamma)} \right)^2 + \nu_2^2 \omega^2 \right] + \frac{2\nu_2 T_2^{(\gamma)}}{m_2} \left[\left(\omega^2 - f_1^{(\gamma)} \right)^2 + \nu_1^2 \omega^2 \right]}{W^{(\gamma)}}, \quad (4)$$

$$W^{(\gamma)} = \left[\omega^2 \left(\omega^2 - \nu_1 \nu_2 - f_1^{(\gamma)} - f_2^{(\gamma)} + f_{21}^{(\gamma)} + f_{12}^{(\gamma)} \right) + f_1^{(\gamma)} f_2^{(\gamma)} - f_1^{(\gamma)} f_{12}^{(\gamma)} - f_2^{(\gamma)} f_{21}^{(\gamma)} \right]^2 + \omega^2 \left[\nu_1 \omega^2 + \nu_2 \omega^2 + \nu_2 \left(f_{21}^{(\gamma)} - f_1^{(\gamma)} \right) + \nu_1 \left(f_{12}^{(\gamma)} - f_2^{(\gamma)} \right) \right]^2, \quad (5)$$

где $G_{1(2)}^{(\gamma)}$ – спектральные плотности смещений частиц в направлении γ ($\gamma = X, Y$ или Z), $G_{+(-)}^{(\gamma)}$ – спектральные плотности для суммы и разности смещений, $f_i^{(\gamma)}$ и $f_{ji}^{(\gamma)}$ – производные удельных внешних и межчастичных сил, действующих на i -ую частицу, соответственно, частицы имеют массу m_i , коэффициенты трения ν_i и температуры теплового источника $T_i^{(\gamma)}$.

Также приведены спектральные плотности для некоторых частных случаев: одинаковый размер частиц, симметричный характер взаимодействия, равенство внешних удерживающих сил и равные источники стохастической кинетической энергии частиц.

В разделе 2.1.5 и 2.1.6 приведены выражения спектральных плотностей для частного случая симметрично взаимодействующих идентичных частиц в ограниченных цепочечных структурах и малоразмерных квазидвумерных кластерах.

В разделе 2.2 описаны условия и параметры численного моделирования. Численное моделирование выполнялось методом молекулярной динамики в широком диапазоне параметров.

Раздел 2.3 посвящен проверке полученных аналитических выражений с помощью численного моделирования систем частиц, взаимодействующих с различными потенциалами. В

разделе 2.3.1 рассматриваются спектральные плотности в системе вертикальной пары частиц при варьировании параметров: потенциал взаимодействия, коэффициенты трения частиц, источники стохастической энергии, размер частиц, также рассмотрено влияние колебаний заряда частиц. В **разделе 2.3.2** рассматриваются спектральные плотности для цепочечных структур как при симметричном взаимодействии, так и при наличии невзаимности за счет модели ионного фокуса, также рассмотрены системы квазидвумерных кластеров. Наблюдается хорошее согласие между аналитическими и численными результатами.

Раздел 2.4 содержит заключение и выводы к Главе 2.

В **третьей главе** представлен метод исследования взаимодействия, основанный на полученных в предыдущей главе аналитических выражениях. Метод спектрального отклика на стохастические процессы позволяет восстанавливать производные удельных сил взаимодействия и удержания, а также коэффициенты трения и спектральные характеристики источников кинетической энергии частиц. Глава состоит из трех частей, включая выводы.

В **разделе 3.1** представлено решение обратной задачи путем аппроксимации экспериментально полученных спектральных плотностей аналитическими выражениями, продемонстрированными во второй главе, с помощью минимизации абсолютной невязки с дополнительными коэффициентами

$$r = \sum_n \zeta_n^2 \sum_j [\tilde{G}_n^{(\gamma)}(\tilde{\omega}_j) - G_n^{(\gamma)}(\tilde{\omega}_j)]^2, \quad (6)$$

используя метод симплексного поиска Лагариаса и др. [61], где $\zeta_n = \max_{m,j} \tilde{G}_m^{(\gamma)}(\tilde{\omega}_j) / \max_j \tilde{G}_n^{(\gamma)}(\tilde{\omega}_j)$, а суммирование производится по всем дискретным частотам $\tilde{\omega}_j$, а также по всем доступным спектрам (то есть по $n = '1', '2', '+', '-'$ в случае двух частиц). Дополнительные коэффициенты ζ_n позволяют учесть различие в амплитудах $\tilde{G}_n^{(\gamma)}$, так как они могут отличаться на несколько порядков. Также работа метода возможна с использованием спектральных плотностей скоростей, полученных как прямым вычислением, так и при формальном преобразовании спектров смещений.

Также в разделе представлены требования к построению спектральной плотности, и соответственно, к условиям проведения экспериментов.

В **разделе 3.2** приведены результаты проверки работы предложенного метода как на исходных численных данных, так и при моделировании погрешности измерений, связанной с определением координат частиц по видеозаписи эксперимента. Продемонстрировано сравнение метода с другими невозмущающими методами изучения сил взаимодействия и анализ рабочего диапазона метода. Сравнение показало значительные преимущества метода, в особенности в работе с данными, имеющими погрешность измерения.

Раздел 3.3 содержит заключение и выводы к Главе 3.

В **четвертой главе** представлены результаты применения спектрального метода для анализа систем микрочастиц в пылевой плазме, полученной в газовых разрядах ВЧ и постоянного тока. При всех параметрах разрядов эффективное взаимодействие между частицами было неважным. Глава состоит из трех частей, включая выводы.

В **разделе 4.1** представлены результаты анализа экспериментов в высокочастотном газовом разряде емкостного типа с вертикальными парами и цепочками пылевых частиц.

В **разделе 4.1.1** рассмотрены условия проведенных экспериментов в лабораторной плазме ВЧ разряда. Описана экспериментальная установка Gaseous Electronics Conference (GEC) для наблюдения пылевых структур (см. Рис. 1(а)). Эксперименты проводились в плазме аргона с вертикальной парой частиц (см. Рис. 1(б)) при значениях давления 70, 136 и 280 мТорр с мощностью разряда 1.9-14.3 Вт. Типичный пример траекторий частиц, полученных в результате компьютерной обработки видеозаписи движения частиц, показан на Рис. 1(в). Также были проанализированы эксперименты с вертикальными цепочечными структурами: системы 4-х частиц при давлении 72 мТорр с мощностью разряда 2.22 Вт и при 140 мТорр и 2.69 Вт, система 8-и частиц при 70 мТорр и 2.4 Вт. Были использованы частицы меламиноформальдегида (MF) размером 8.89 мкм.

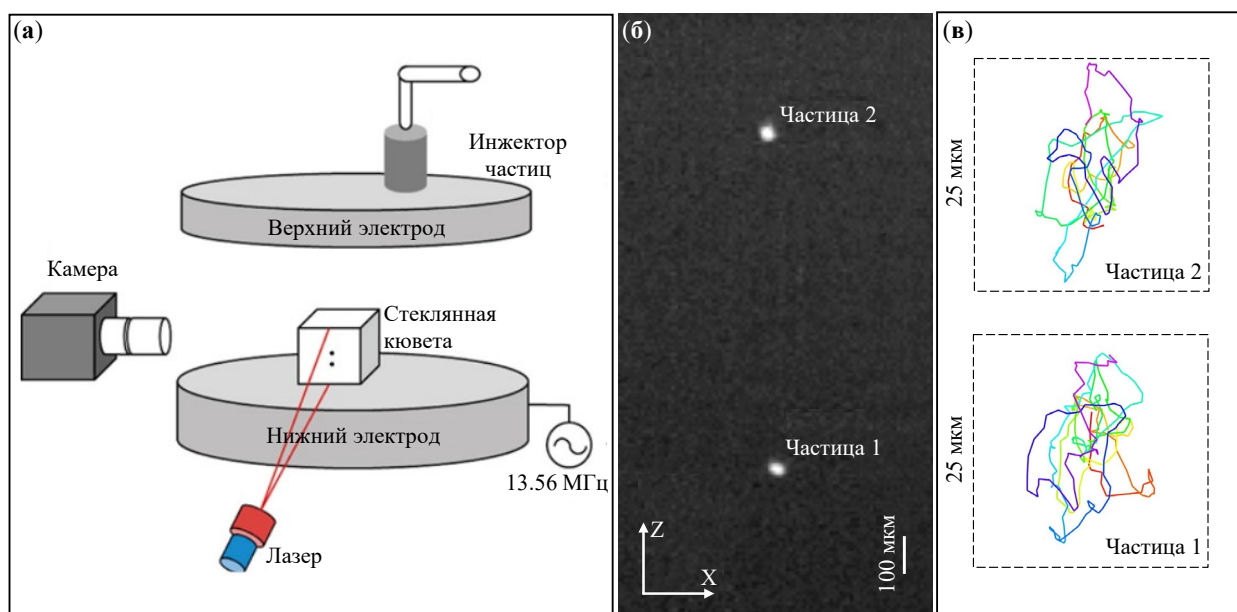


Рис. 1. (а) Схема экспериментальной установки в ВЧ разряде; (б) видеокادر с изображением частиц при давлении 136 мТорр и мощности разряда 2.33 Вт; (в) траектории движения частиц, полученные в результате компьютерной обработки видеозаписи их движения за 1 секунду.

В **разделе 4.1.2** представлены результаты первой экспериментальной апробации метода, основанного на анализе спектральной плотности. В результате анализа экспериментальных данных с помощью новой методики было обнаружено, что спектральная плотность колебаний

для двух взаимодействующих частиц в приэлектродном слое существенно отличается от спектра, найденного для системы с взаимным межчастичным взаимодействием, см. рис. 2 (нумерация частиц снизу вверх).

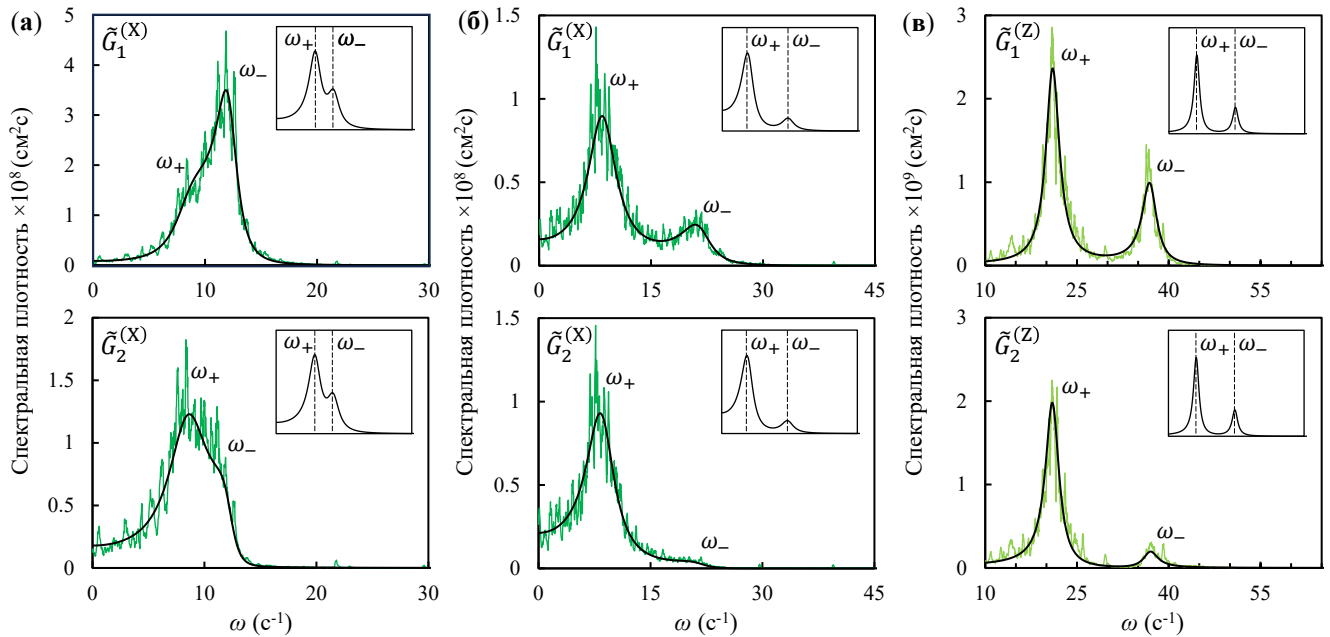


Рис. 2. Спектральные плотности $\tilde{G}_i^{(\gamma)}$ ($i = '1', '2'$) колебаний частиц **(а)** в горизонтальном направлении ($\gamma = X$) при давлении газа $P = 136$ мТорр и мощности разряда $W = 4$ Вт; **(б)** $\gamma = X$, $P = 136$ мТорр, $W = 14.3$ Вт; **(в)** в вертикальном направлении ($\gamma = Z$) при $P = 70$ мТорр, $W = 14.3$ Вт; и их аналитические аппроксимации уравнениями (2)-(5). Для сравнения на вставках показаны схематические распределения соответствующих спектральных плотностей для частиц, взаимодействующих с чисто отталкивающим сферически-симметричным потенциалом.

Аппроксимация экспериментально измеренных спектральных плотностей с использованием аналитических выражений (2)-(5) позволила определить производные удельных сил взаимодействия и удельных сил удержания в зависимости от мощности ВЧ и давления газа, см. Рис. 3 и Рис. 4(а).

Получено, что отношение производных удельных внешних сил, удерживающих частицы в горизонтальном направлении, при всех давлениях уменьшается от ~ 1 до ~ 0.8 с увеличением мощности, см рис. 4(а). Поскольку в эксперименте использовались монодисперсные частицы, можно сделать вывод, при более высоких мощностях разряда наблюдается уменьшение заряда нижней частицы на $\sim 20\%$, то есть эффект разрядки.

По всем параметрам разряда эффективное взаимодействие между частицами было невязанным, см. Рис. 3. Отрицательные значения производной силы, действующей со стороны верхней частицы на нижнюю, см. Рис. 3(а) для $f_{21}^{(X)}$, показывают, что при горизонтальном смещении нижней частицы из ее положения равновесия возникает эффективная сила

притяжения, которая стремится вернуть нижнюю частицу в исходное положение равновесия. Используя предположение о флуктуации заряда нижней частицы, было определено, что экстремум потенциала межчастичного взаимодействия (так называемый «ионный фокус») расположен между частицами. Также показано, что даже небольшие пространственные флуктуации заряда нижней частицы (порядка 0.1-1%), вызванные тепловым движением в поле ионного следа верхней, могут привести к значительной ошибке в определении эффективного взаимодействия между частицами. Была измерена сила, которую нижняя частица оказывает на верхнюю частицу. Получено, что эта сила увеличивается с увеличением ВЧ мощности и давления газа, см. Рис. 4(б).

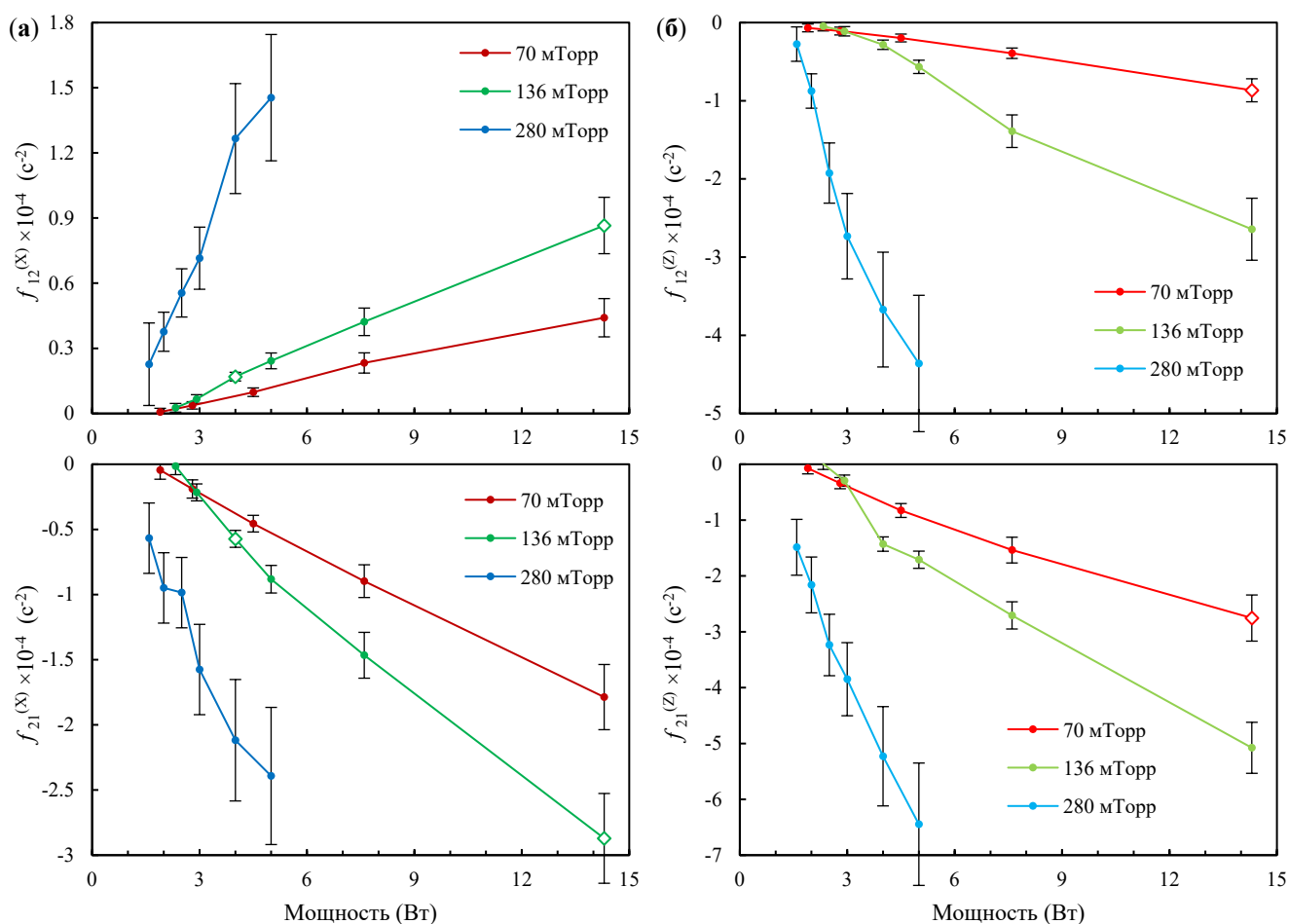


Рис. 3. Производные удельных сил взаимодействия $f_{21}^{(\gamma)}$ и $f_{12}^{(\gamma)}$, полученные при различных давлениях и мощностях ВЧ (а) в горизонтальном направлении ($\gamma = X$) и (б) в вертикальном направлении ($\gamma = Z$). Ромбами обозначены эксперименты, для которых спектральные плотности представлены на Рис. 2. $f_{12}^{(\gamma)}$ – производная удельной силы, с которой нижняя частица действует на верхнюю, $f_{21}^{(\gamma)}$ – производная удельной силы со стороны верхней частицы.

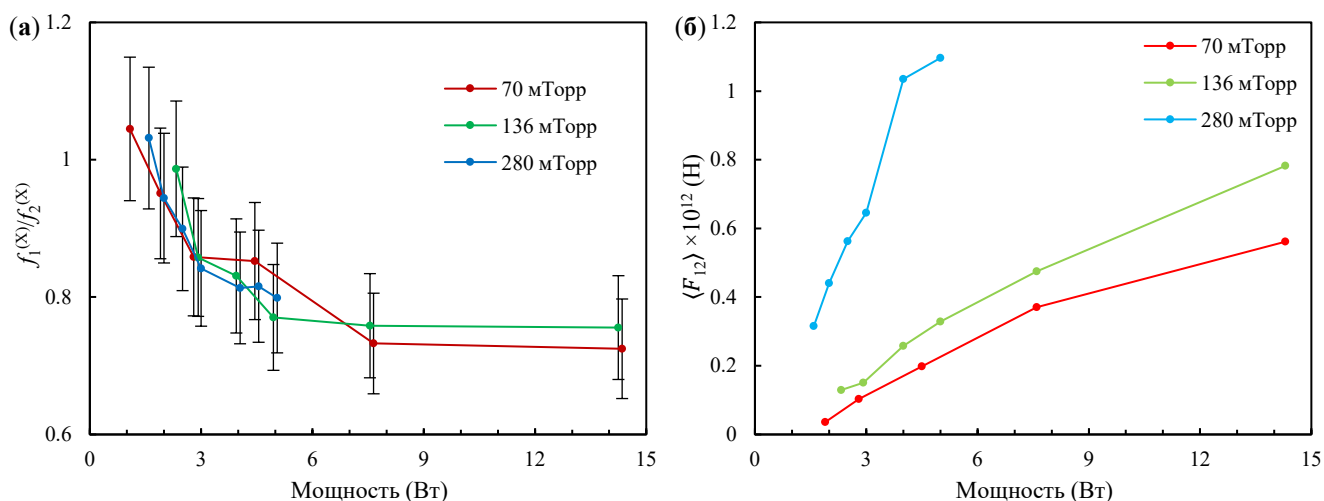


Рис. 4. (а) Отношение $f_1^{(X)}/f_2^{(X)}$ производных удельных внешних сил, ограничивающих частицы в горизонтальном направлении, в зависимости от мощности разряда при различных давлениях газа; (б) оценка силы $\langle F_{12} \rangle$, с которой нижняя частица действует на верхнюю.

В разделе 4.1.3 представлены результаты впервые проведенного детального изучения сил эффективного взаимодействия микрочастиц в цепочечных структурах в плазме ВЧ разряда. Зарегистрировано значительное нарушение симметрии эффективного взаимодействия между всеми парами частиц (ближайших соседей) в цепочках, см. Рис.5, где представлен пример полученных производных для цепочек из 8 частиц (нумерация частиц начинается с верхней (по направлению ионного потока) частицы). Аналогично случаю с двумя частицами здесь отмечено присутствие сил притяжения, стремящихся поместить нижерасположенные частицы строго под вышерасположенные. В случае цепочки из 8 частиц определено, что наибольшее нарушение симметрии взаимодействия соответствует наименьшему среднему расстоянию между частицами, а также в нижней части структуры асимметрия уменьшается в направлении ионного потока.

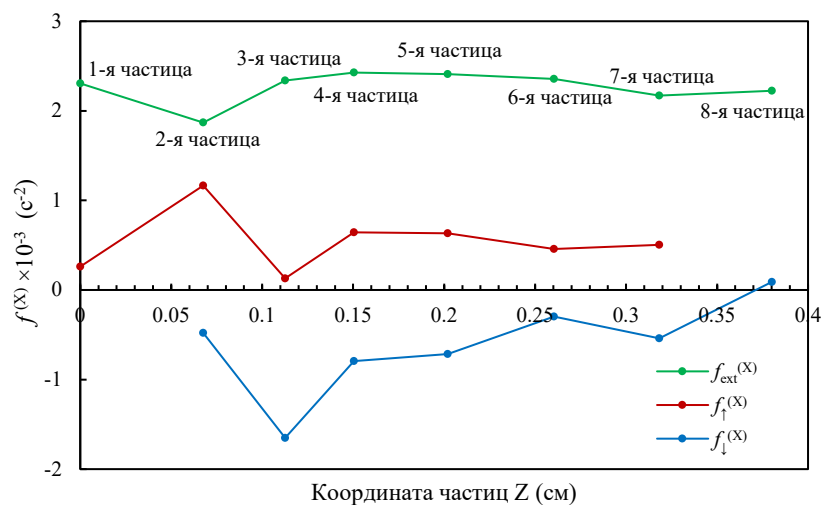


Рис. 5. Производные удельных сил, действующих на i -ю частицу (нумерация начинается с верхней частицы по направлению ионного потока) в цепочке из 8-и частиц при давлении 70

мТорр и 2.4 Вт: $f_{\text{ext}}^{(X)}$ (зеленый цвет) – внешняя сила со стороны поля ловушки, $f_{\uparrow}^{(X)}$ (красный) – сила, с которой ближайшая нижерасположенная частица (под номером $i + 1$) воздействует на i -ю частицу, $f_{\downarrow}^{(X)}$ (синий) – сила, с которой вышерасположенная частица (под номером $i - 1$) действует на i -ю частицу.

В разделе 4.2 рассматриваются результаты анализа экспериментов в стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока.

В разделе 4.2.1 рассмотрены условия проведенных экспериментов в газовом разряде постоянного тока и описана экспериментальная установка для наблюдения пылевых структур. В эксперименте использовалась газоразрядная стеклянная трубка при рабочем давлении 2 Па. Сила тока разряда менялась в диапазоне от 0.75 мА до 1.95 мА, а напряжение разряда варьировалось в диапазоне от 4.00 кВ до 6.23 кВ при неизменном давлении. Использовались монодисперсные частицы полистирола диаметром 4.6 мкм, которые поштучно вбрасывались в разряд. Частицы падали в область положительного столба разряда, где происходила их зарядка и захват в областях ионизации – стратах. Эксперименты проводились как с уединенной частицей, так и с 2 и 3 частицами в различных пространственных конфигурациях. Также для создания внешних возмущений использовался сфокусированный пучок лазерного излучения диаметром 1 мм. Лазерные манипуляции в ходе эксперимента показали, что пара частиц при изучаемых параметрах разряда может находиться в двух устойчивых конфигурациях: вертикальной и горизонтальной, см. Рис. 6(а) и 6(б). Также в случае вброса дополнительной третьей частицы наблюдалось сосуществование вертикальной и горизонтальной конфигураций, см. Рис. 6(в).

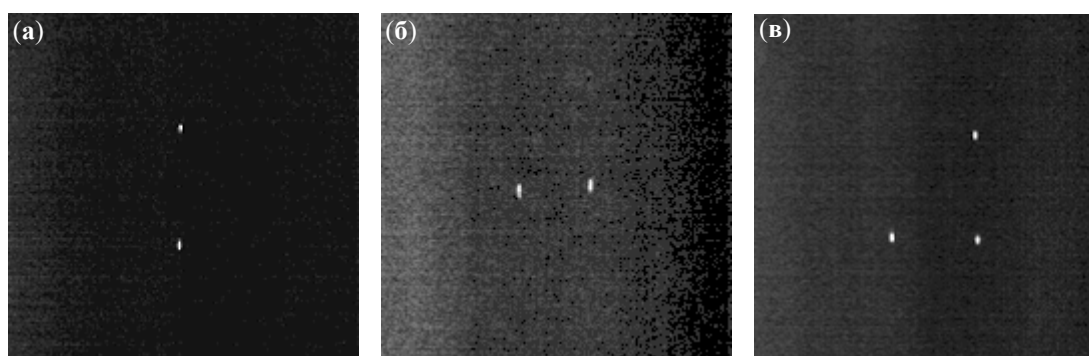


Рис. 6. Кадры видеозаписей различных положений микрочастиц в нижней страте положительного столба разряда постоянного тока при давлении буферного газа 2 Па и силе тока 0.75 мА. (а) – вертикальная конфигурация частиц до лазерного воздействия (для определенности нижней частице присвоен индекс «1», а верхней – «2»); (б) – частицы в горизонтальной плоскости после воздействия лазером на нижнюю частицу; (в) – устойчивая конфигурация из трёх частиц.

В разделе 4.2.2 представлены результаты восстановления действующих сил. Анализировались эксперименты с уединенной частицей, были получены данные о силах, действующих на заряженную микрочастицу со стороны страты, см. Рис. 7(а). В случае экспериментов с вертикальной парой частиц аналогично экспериментам в ВЧ разряде отмечены значительное нарушение симметрии взаимодействия и отрицательные значения производной удельной силы $f_{21}^{(X)}$, с которой верхняя частица действует на нижнюю в горизонтальном направлении, то есть присутствие эффективной силы притяжения, см. Рис. 7(б). Также наблюдался эффект разрядки – с увеличением разрядного тока отношение q_1/q_2 изменилось с 0.75 до 0.7, см. Рис. 7(в).

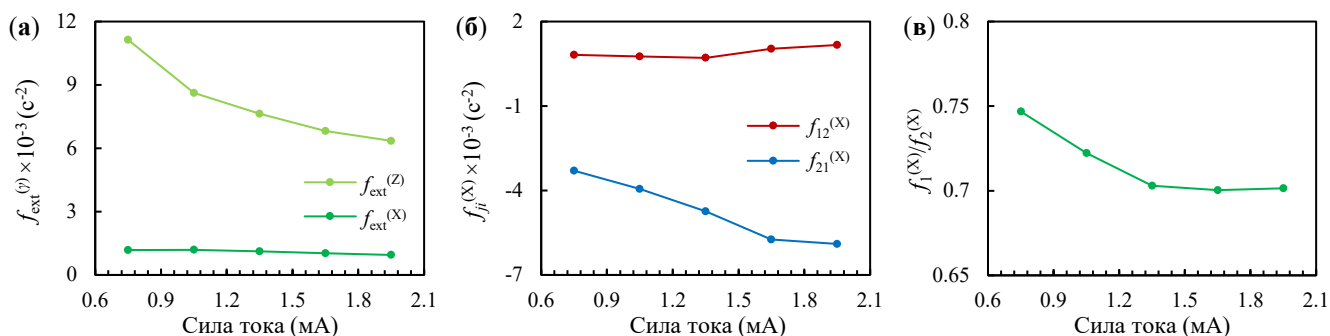


Рис. 7. Производные удельных (а) удерживающих сил, действующих на одиночную частицу ($f_{\text{ext}}^{(X)}$ и $f_{\text{ext}}^{(Z)}$) и (б) сил взаимодействия, действующих между вертикально ориентированными частицами ($f_{21}^{(X)}$ и $f_{12}^{(X)}$), в зависимости от разрядного тока. (в) Отношение $f_1^{(X)}/f_2^{(X)}$ для вертикальной пары частиц в зависимости от тока разряда.

В разделе 4.2.3 рассмотрены основные критерии устойчивости вертикальной пары частиц в разных случаях: симметрично взаимодействующие частицы с одинаковыми массами и зарядами, пара частиц, имеющих разные заряды, и частицы, имеющие разные заряды и взаимодействующие несимметрично.

В разделе 4.2.4 представлены результаты экспериментальной проверки критериев устойчивости вертикальной пары частиц. Количественно исследованное межчастичное взаимодействие и электрическое поле страты в области левитации частиц позволили проверить аналитические критерии устойчивости.

Раздел 4.3 содержит заключение и выводы к Главе 4.

Пятая глава посвящена аналитическому и численному исследованию процессов диффузии, спектральных и структурных характеристик для ограниченных ансамблей заряженных броуновских частиц в присутствии магнитного поля. Глава состоит из трех разделов, включая выводы.

В разделе 5.1 представлены результаты аналитического и численного анализа динамики ограниченных систем заряженных броуновских частиц, находящегося в постоянном электромагнитном поле. Расчеты выполнялись для частиц с различными массами и зарядами в широком диапазоне параметров исследуемых систем. Показано, что для слабонеидеальных систем поперечный коэффициент диффузии для ансамбля частиц в магнитном поле соответствует формуле Таунсенда. Предложены аналитические оценки для анализа величины эффективного радиуса диффузии ансамбля частиц за счет их теплового движения. Предложенные соотношения были проверены путем численного моделирования задачи.

В разделе 5.2 представлены результаты аналитического и численного исследования динамики ограниченных систем заряженных броуновских частиц в удерживающем силовом поле в присутствии магнитного поля. Моделирование выполнялось для кластерных систем, состоящих из частиц с кулоновским взаимодействием (приблизительно до тысячи), в широком диапазоне их параметров. Предложено аналитическое соотношение для спектральной плотности смещений центра масс исследуемых систем. Выполнено сравнение спектральных и структурных характеристик моделируемых систем. Представлен анализ зависимости формы парной корреляционной функции и размеров кластерных систем от температуры и количества частиц. Исследована связь спектральной плотности смещений центра масс и отдельных частиц со структурными характеристиками и параметром неидеальности моделируемых ансамблей.

Раздел 5.3 содержит заключение и выводы к Главе 5.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Получены аналитические выражения спектральных плотностей случайных процессов в обобщенной системе несимметрично связанных гармонических осцилляторов.
2. Исследовано влияние основных параметров системы заряженных броуновских частиц с несимметричным межчастичным взаимодействием в удерживающем силовом поле (таких как, невзаимность и неидентичность частиц, трение, интенсивность тепловых источников, колебание заряда, число частиц) на спектральную плотность их колебаний.
3. Предложен новый метод для определения сил взаимодействия между частицами в плазменно-пылевых структурах. Метод основан на анализе спектральной плотности колебаний, и позволяет восстанавливать как производные удельных сил взаимодействия, так и параметры внешнего удерживающего потенциала, коэффициенты трения и спектральные характеристики тепловых источников частиц. В отличие от методов, разработанных ранее, предлагаемый метод: не требует специальной конструкции экспериментальной установки и не вносит возмущений в исследуемую систему частиц; не опирается на предварительные измерения или теоретические модели электрических полей и внешних сил; может применяться для систем, состоящих из двух или более взаимодействующих частиц.

4. Предложенный метод протестирован на результатах численного моделирования, также проведено сравнение с другими невозмущающими методами с учетом возможной погрешности измерения. В ходе сравнения метод показал значительные преимущества.

5. Детально изучены силы эффективного взаимодействия между микрочастицами в газовых высокочастотных разрядах и тлеющих разрядах постоянного тока. При всех параметрах разрядов эффективное взаимодействие между частицами было невзаимным. Отмечено присутствие эффективной силы притяжения нижней частицы со стороны верхней. Обнаружено, что небольшие (порядка 0.1–1%) пространственные флуктуации заряда нижней частицы могут привести к значительному изменению эффективного взаимодействия между частицами

6. Проведен анализ взаимодействия между пылевыми частицами в цепочечных системах, образующихся в приэлектродном слое ВЧ разряда. С помощью метода, основанного на анализе спектральной плотности колебаний частиц, определены производные удельных внешних и межчастичных сил.

7. Изучен эффект разрядки как в ВЧ разряде, так и в разряде постоянного тока. Отмечено уменьшение заряда нижней частицы более 20% относительно верхней в парах частиц.

8. Полученные экспериментальные данные в газовом разряде постоянного тока позволили проверить критерии конфигурационной неустойчивости системы.

9. Получены новые данные о влиянии магнитного поля на процессы диффузии, спектральные и структурные характеристики для ограниченных систем заряженных броуновских частиц в пространственно-однородном электрическом поле и в поле ловушки.

10. Исследовано воздействие тепловых колебаний на движение частиц в постоянном электромагнитном поле. Предложены аналитические оценки эффективного радиуса тепловых колебаний частиц. Предложенные формулы были подтверждены с помощью численного моделирования задачи.

Публикации автора по теме диссертации

1. Sametov E.A., Timirkhanov R.A., Vaulina O.S. Influence of thermal fluctuations on dynamics of charged particles in electromagnetic fields // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24, № 12. P. 123504.

2. Ваулина О.С., Лисин Е.А., Саметов Э.А. Процессы диффузии для ограниченного ансамбля заряженных частиц в постоянном магнитном поле // *ЖЭТФ*. 2017. Т. 152, № 5. С. 1144–1151.

3. Ваулина О.С., Саметов Э.А. Спектральные и структурные характеристики для кластерных систем заряженных броуновских частиц // *ЖЭТФ*. 2018. Т. 154, № 2(8). С. 407–414.

4. Vaulina O.S., Lisin E.A., Sametov E.A., Timirkhanov R.A. Thermal Motion of Charged Particles in Confined Ensemble under Constant Electromagnetic Field // *Plasma and Fusion Research*. 2018. Vol. 13, P. 1406125–1406125.

5. Ваулина О.С., Саметов Э.А. Влияние магнитного поля на спектральные характеристики теплового движения заряженных частиц в изотропной ловушке // *Физ. плазмы*. 2019. Т. 45, № 3. С. 258–267.

6. Ваулина О.С., Саметов Э.А. Влияние магнитного поля на динамику движения заряженных частиц в кластерных системах // *ЖЭТФ*. 2019. № 5. С. 947–955.

7. Саметов Э.А., Лисин Е.А., Ваулина О.С. Колебания диссипативной системы двух невязанно связанных осцилляторов при воздействии случайных сил // *Вестник ОИВТ РАН*. 2019. Т. 2, № 1. С. 33–35.

8. Саметов Э.А., Лисин Е.А., Ваулина О.С. Спектральные характеристики стохастического движения в системе из двух взаимодействующих частиц // *ЖЭТФ*. 2020. Т. 157, № 3. С. 552–560.

9. Ваулина О.С., Саметов Э.А., Лисин Е.А. Спектральные характеристики заряженных частиц в ограниченных цепочечных структурах // *ЖЭТФ*. 2020. Т. 158, № 2(8). С. 399–412.

10. Lisin E.A., Petrov O.F., Sametov E.A., Vaulina O.S., Statsenko K.B., Vasiliev M.M., Carmona-Reyes J., Hyde T.W. Experimental study of the nonreciprocal effective interactions between microparticles in an anisotropic plasma // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10, № 1. P. 13653.

11. Ваулина О.С., Саметов Э.А., Лисин Е.А., Лисина И.И. Спектральные характеристики для малоразмерных квазидвумерных кластеров // *Физ. плазмы*. 2020. Т. 46, № 12. С. 1125–1134.

12. Lisin E.A., Kononov E.A., Sametov E.A., Vasiliev M.M., Petrov O.F. Alignments of a Microparticle Pair in a Glow Discharge // *Molecules*. 2021. Vol. 26, № 24. P. 7535.

13. Саметов Э.А., Лисин Е.А., Ваулина О.С. Спектры колебаний броуновских частиц в ловушке с эффективным нарушением симметрии межчастичного взаимодействия // *Физ. плазмы*. 2023. Т. 49, № 1. С. 67–74.

Список литературы

1. Fortov V.E., Morfill G.E. Complex and Dusty plasmas: From Laboratory to Space. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
2. Ivlev A. et al. Complex Plasmas and Colloidal Dispersions: Particle-Resolved Studies of Classical Liquids and Solids. WORLD SCIENTIFIC, 2012. Vol. 5.
3. Vladimirov S.V., Ostrikov K., Samarian A.A. Physics and Applications of Complex Plasmas. PUBLISHED BY IMPERIAL COLLEGE PRESS AND DISTRIBUTED BY WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO., 2005.
4. Пылевая плазма: Эксперимент и теория / ed. Ваулина О.С. et al. Москва: Физматлит, 2009. 315 p.
5. Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // УФН. 1997. Vol. 167, № 1. P. 57.
6. D'Angelo N. Coulomb solids and low-frequency fluctuations in RF dusty plasmas // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28, № 5. P. 1009–1010.
7. Merlino R.L. et al. Laboratory studies of waves and instabilities in dusty plasmas // Physics of Plasmas. 1998. Vol. 5, № 5. P. 1607–1614.
8. Клумов Б.А. О критериях плавления комплексной плазмы // УФН. 2010. Vol. 180, № 10. P. 1095–1108.
9. Fortov V.E. et al. Mechanism of dust-acoustic instability in a direct current glow discharge plasma // Physics of Plasmas. 2000. Vol. 7, № 5. P. 1374–1380.
10. Nunomura S. et al. Instability of Dust Particles in a Coulomb Crystal due to Delayed Charging // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83, № 10. P. 1970–1973.
11. Samarian A.A. et al. Self-excited vertical oscillations in an rf-discharge dusty plasma // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64, № 2. P. 025402.
12. Ichimaru S. Strongly coupled plasmas: high-density classical plasmas and degenerate electron liquids // Rev. Mod. Phys. 1982. Vol. 54, № 4. P. 1017–1059.
13. Ikezi H. Coulomb solid of small particles in plasmas // The Physics of Fluids. 1986. Vol. 29, № 6. P. 1764–1766.
14. Chu J.H., I L. Direct observation of Coulomb crystals and liquids in strongly coupled rf dusty plasmas // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 72, № 25. P. 4009–4012.
15. Thomas H. et al. Plasma Crystal: Coulomb Crystallization in a Dusty Plasma // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 73, № 5. P. 652–655.
16. Melzer A., Trottenberg T., Piel A. Experimental determination of the charge on dust particles forming Coulomb lattices // Physics Letters A. 1994. Vol. 191, № 3–4. P. 301–308.

17. Yasuaki Hayashi Y.H., Kunihide Tachibana K.T. Observation of Coulomb-Crystal Formation from Carbon Particles Grown in a Methane Plasma // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1994. Vol. 33, № 6A. P. L804.
18. Фортвов В.Е. et al. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда // *Письма в ЖЭТФ.* 1996. Vol. 64, № 2. P. 86–91.
19. Липаев А.М. et al. Упорядоченные структуры в неидеальной пылевой плазме тлеющего разряда // *ЖЭТФ.* 1997. Vol. 112, № 6(12). P. 2030–2044.
20. Нефедов А.П. et al. Возникновение жидкостных и кристаллических структур в пылевой плазме // *Письма в ЖЭТФ.* 2000. Vol. 72, № 4. P. 313–326.
21. Fortov V.E. et al. Particle ordered structures in a strongly coupled classical thermal plasma // *Phys. Rev. E.* 1996. Vol. 54, № 3. P. R2236–R2239.
22. Fortov V.E. et al. Experimental observation of Coulomb ordered structure in sprays of thermal dusty plasmas // *Jetp Lett.* 1996. Vol. 63, № 3. P. 187–192.
23. Фортвов В.Е. et al. Пылевая плазма, индуцированная солнечным излучением, в условиях микрогравитации: эксперимент на борту российской космической станции “Мир” // *ЖЭТФ.* 1998. Vol. 114, № 6. P. 2004–2021.
24. Fortov V.E. et al. Dust particles in a nuclear-induced plasma // *Physics Letters A.* 1999. Vol. 258, № 4–6. P. 305–311.
25. Ваулина О.С., Васильева Е.В., Тимирханов Р.А. Параметры плазмы и условия существования монослойных пылевых структур в приэлектродном слое вч-разряда // *Физ. плазмы.* 2011. Vol. 37, № 12. P. 1112.
26. Герасимов Ю.В. et al. Формирование структур из макрочастиц в плазме ВЧ разряда индукционного типа // *Письма в ЖЭТФ.* 1998. Vol. 24, № 19. P. 62.
27. Fortov V.E. et al. Filamentary dusty structures in RF inductive discharge // *Physics Letters A.* 2000. Vol. 267, № 2–3. P. 179–183.
28. Goertz C.K. Dusty plasmas in the solar system // *Reviews of Geophysics.* 1989. Vol. 27, № 2. P. 271–292.
29. Horányi M. et al. Dusty plasma effects in Saturn’s magnetosphere // *Rev. Geophys.* 2004. Vol. 42, № 4.
30. Klumov B.A., Popel S.I., Bingham R. Dust particle charging and formation of dust structures in the upper atmosphere // *Jetp Lett.* 2000. Vol. 72, № 7. P. 364–368.
31. Dubinskii A.Yu., Popel S.I. Formation and evolution of dusty plasma structures in the ionosphere // *Jetp Lett.* 2012. Vol. 96, № 1. P. 21–26.
32. Rennilson J.J., Criswell D.R. Surveyor observations of lunar horizon-glow // *The Moon.* 1974. Vol. 10, № 2. P. 121–142.

33. Whipple E.C. Potentials of surfaces in space // Rep. Prog. Phys. 1981. Vol. 44, № 11. P. 1197–1250.
34. Попель С.И. et al. Пылевая плазма у поверхности Луны // Астрон. вестн. 2013. Vol. 47, № 6. P. 455–466.
35. Kersten H. et al. Micro-Disperse Particles in Plasmas: From Disturbing Side Effects to New Applications // Contrib. Plasma Phys. 2001. Vol. 41, № 6. P. 598–609.
36. Hwang N.M. et al. Growth of silicon nanowires by chemical vapor deposition: approach by charged cluster model // Journal of Crystal Growth. 2000. Vol. 218, № 1. P. 33–39.
37. Selwyn G.S., Singh J., Bennett R.S. *In situ* laser diagnostic studies of plasma-generated particulate contamination // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 1989. Vol. 7, № 4. P. 2758–2765.
38. Winter J. Dust: A new challenge in nuclear fusion research? // Physics of Plasmas. 2000. Vol. 7, № 10. P. 3862–3866.
39. Girard J.-Ph. et al. ITER, safety and licensing // Fusion Engineering and Design. 2007. Vol. 82, № 5–14. P. 506–510.
40. Баранов. Изотопы: свойства, получение, применение. Москва: Физматлит, 2005. 598 p.
41. Filippov A.V. et al. Atomic battery based on ordered dust–plasma structures // Ukr. J. Phys. 2005. Vol. 50, № 2. P. 137–143.
42. Jung H. et al. Exploring the wake of a dust particle by a continuously approaching test grain // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22, № 5. P. 053702.
43. Yousefi R. et al. Charge of dust particles in a particle chain: arXiv:1607.03177. arXiv, 2016.
44. Takahashi K. et al. Analyses of attractive forces between particles in Coulomb crystal of dusty plasmas by optical manipulations // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 58, № 6. P. 7805–7811.
45. Melzer A., Schweigert V.A., Piel A. Transition from Attractive to Repulsive Forces between Dust Molecules in a Plasma Sheath // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 83, № 16. P. 3194–3197.
46. Chen M. et al. Ion-wake field inside a glass box // Phys. Rev. E. 2016. Vol. 94, № 3. P. 033201.
47. Prior N.J., Mitchell L.W., Samarian A.A. Determination of charge on vertically aligned particles in a complex plasma using laser excitations // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36, № 11. P. 1249–1253.
48. Kroll M. et al. On the influence of wakefields on three-dimensional particle arrangements // Physics of Plasmas. 2010. Vol. 17, № 1. P. 013702.
49. Hebner G.A., Riley M.E., Marder B.M. Dynamic probe of dust wakefield interactions using constrained collisions // Phys. Rev. E. 2003. Vol. 68, № 1. P. 016403.
50. Vaulina O.S. et al. Determination of Pair Interaction Forces between Particles in Nonideal Dissipative Systems // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 103, № 3. P. 035003.

51. Lisin E.A. et al. Solution of the inverse Langevin problem for open dissipative systems with anisotropic interparticle interaction // *Physics of Plasmas*. 2015. Vol. 22, № 3. P. 033704.
52. Ваулина О.С. et al. Анализ парного межчастичного взаимодействия в неидеальных диссипативных системах // *ЖЭТФ*. 2010. Vol. 137, № 4. P. 751–766.
53. Qiao K. et al. Non-perturbative experiments on plasma-mediated particle interaction and the ion wake potential: arXiv:1810.07173. arXiv, 2018.
54. Lisin E.A., Vaulina O.S., Petrov O.F. Correlational approach to study interactions between dust Brownian particles in a plasma // *Physics of Plasmas*. 2018. Vol. 25, № 1. P. 013702.
55. Kryuchkov N.P. et al. Strange attractors induced by melting in systems with nonreciprocal effective interactions // *Phys. Rev. E*. 2020. Vol. 101, № 6. P. 063205.
56. Nikolaev V.S., Timofeev A.V. Inhomogeneity of a harmonically confined Yukawa system // *Physics of Plasmas*. 2019. Vol. 26, № 7. P. 073701.
57. Hariprasad M.G. et al. Self-sustained non-equilibrium co-existence of fluid and solid states in a strongly coupled complex plasma system // *Sci Rep*. 2022. Vol. 12, № 1. P. 13882.
58. Mukhopadhyay A.K., Goree J. Experimental measurement of velocity correlations for two microparticles in a plasma with ion flow // *Phys. Rev. E*. 2014. Vol. 90, № 1. P. 013102.
59. Игнатов А.М. Устойчивость линейного плазменного кристалла // *Физ. плазмы*. 2020. Vol. 46, № 3. P. 213–218.
60. Игнатов А.М. Влияние невзаимных сил на устойчивость пылевых кластеров // *Физ. плазмы*. 2021. Vol. 47, № 5. P. 391–400.
61. Lagarias J.C. et al. Convergence Properties of the Nelder--Mead Simplex Method in Low Dimensions // *SIAM J. Optim.* 1998. Vol. 9, № 1. P. 112–147.

Саметов Эдуард Александрович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Спектральная плотность случайных процессов и
межчастичное взаимодействие в комплексной плазме