

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра  
«Институт общей физики им.

А.М. Прохорова  
Российской академии наук»  
член-корреспондент РАН



«08»

*Гарнов С.В.*

/Гарнов С.В./  
2022 г.

М.П.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Кононова Евгения Александровича «Активное броуновское движение сильновзаимодействующих заряженных частиц в газоразрядной плазме» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Диссертационная работа Кононова Евгения Александровича посвящена экспериментальному исследованию активного броуновского движения частиц, формирующих упорядоченные структуры в газоразрядной плазме, в том числе при температурах сверхтекучего гелия.

В работе описаны экспериментальные стенды для удержания и диагностики упорядоченных структур в плазме газовых разрядов различного вида — высокочастотного емкостного и тлеющего постоянного тока, в том числе при температуре 1.6 K и выше; результаты экспериментального исследования модификации поверхности макрочастиц, а именно, образования металлического покрытия, при их экспозиции в приэлектродной области высокочастотного разряда; экспериментальные исследования характера движения полимерных частиц с модифицированной поверхностью при воздействии лазерного излучения; анализ структурных характеристик для монослоя из модифицированных частиц при воздействии лазерного излучения; анализ структурных и динамических характеристик активных броуновских макрочастиц в цепочечной структуре, сформированной в плазме тлеющего разряда постоянного тока; экспериментальные условия и результаты исследований процессов самоорганизации и эволюции мультимодальной пылевой плазмы, сформированной в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока при температуре сверхтекучего гелия.

Работа обладает **научной новизной** и является **актуальной**.

Активная материя представляет собой новый и весьма сложный объект. Активные частицы способны автономно преобразовывать доступную энергию окружающей среды (химическую, электромагнитную, тепловую и т.д.) в собственное механическое движение. Синтетические активные частицы, как правило, состоят из композиционных материалов, составные части которых по-разному взаимодействуют со средой или имеют различный отклик на внешние возмущения. Независимо от природы своего происхождения, система активных частиц находится вдали от термодинамического равновесия. В жидких и газообразных коллоидных системах реализуется броуновское движение частиц. Обычно оно является пассивным, так как обусловлено тепловым хаотичным движением среды и ее взаимодействием с частицами. В том случае, если система преобразует получаемую извне энергию в направленное движение частиц в ней, уже возникает активное броуновское движение. Интересно, что способностью к активному броуновскому движению обладают не только микрообъекты вроде бактерий и янус-частиц, но и живые организмы и системы макромасштаба. В настоящее время наиболее перспективными направлениями использования активных коллоидных систем являются медицина, химические технологии, нанотехнологии, фотоника и др. Примерами является направленный транспорт лекарственных веществ, биомаркеры, материалы для микроэлектроники и энергосберегающих технологий, также потенциально активные коллоидные системы могут применяться в нефтяной промышленности. Изучение явлений, связанных с структурными переходами в активных системах, в том числе в плазменно-пылевых структурах активных броуновских частиц – актуальная задача, позволяющая исследовать эволюцию и самоорганизацию сильнонеидеальных диссипативных систем. Динамика активных систем в лабораторных условиях может быть весьма разнообразна: от образования и разрушения структур до их качественной эволюции. Управление коллоидными системами, находящимися в неравновесном состоянии, является фундаментальной задачей, которая может быть полезной для разработки инновационных материалов, а также для понимания закономерностей активности у искусственных и живых объектов. Все вышесказанное определяет **актуальность данной работы**.

**Структура диссертационной работы.** Диссертационная работа Кононова Евгения Александровича состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии. Полный текст диссертации составляет 106 страниц, включая 34 рисунка, 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 153 наименования.

Во **введении** дано краткое обоснование направления исследований, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются положения, выносимые на защиту, а также представлен список основных публикаций автора по теме диссертации, где отмечен его личный вклад.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору литературы по теме диссертации. Вводится определение активного броуновского движения, рассматриваются виды активных броуновских частиц и механизмы активного движения, приведено краткое описание свойств пылевой плазмы и пылевых макрочастиц, а также рассмотрена роль явления активности в процессах самоорганизации плазменно-пылевых структур.



Во **второй главе** представлены результаты экспериментального изучения лазерно-индуцированного активного броуновского движения макрочастиц как результат их модификации в плазме высокочастотного емкостного разряда. Показано, что в приэлектродной области высокочастотного разряда частицы модифицируются и приобретают металлическое покрытие, при этом свойства их поверхности изменяются. Наблюдалось изменение характера движения полимерных частиц с модифицированной поверхностью в квазидвумерной пылевой структуре при изменении интенсивности воздействующего лазерного излучения. Проведенный анализ траекторий и среднего квадратичного смещения макрочастиц в монослое отображает изменение динамики движения макрочастиц при различной интенсивности лазерного излучения: удержание ловушкой; броуновское движение и комбинированное направлено-случайное движение, состоящее из лазерно-индуцированного (фотофорез) и броуновского движения. Анализ линейного смещения макрочастиц до изменения направления движения и отклонения от него при различных значениях интенсивности лазерного излучения показал, что макрочастицы начинают проявлять активность при воздействии на них лазерного излучения и их активность растет с увеличением мощности воздействующего лазерного излучения. Появившийся в результате модификации поверхности механизм преобразования энергии лазерного излучения в энергию движения позволил полимерным частицам изменять динамику своего движения и степень своей активности при изменении мощности воздействующего лазерного излучения. Экспериментально наблюдались рост кинетической энергии и структурный переход «кристалл-жидкость» в квазидвумерной структуре модифицированных частиц, левитирующих в приэлектродном слое емкостного высокочастотного разряда. Предложено объяснение структурного перехода в структуре из модифицированных частиц с учетом роли фотофоретической силы в движении макрочастиц.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям активного броуновского движения частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при различных температурах буферного газа. Показаны изменения локализации и рост активности медных микрочастиц в цепочечной структуре по мере увеличения интенсивности разогревающего лазерного излучения. Проведенный анализ траекторий, динамической энтропии и среднего квадратичного смещения макрочастиц в цепочечной структуре отображает изменение динамики движения частиц по мере увеличения интенсивности лазерного излучения: движение в ловушке; движение внутри оболочек цепочечных структур; «обмен» частицами между цепочками. Анализ линейного смещения до изменения направления движения и отклонения от него макрочастиц при различных значениях интенсивности лазерного излучения показал, что изменение динамики движения частиц и структурный переход с обменом фрагментами цепочек внутри структуры стали возможны благодаря механизму преобразования энергии оптического излучения в энергию движения частиц, то есть активности медных частиц. При гелиевых температурах наблюдалась и была исследована мультимодальная сложная плазма, образованная сфероидальной плазменно-пылевой структурой, состоящей из полидисперсных частиц оксида церия, наложенных на облако наночастиц и твердых спиральных волокон в диапазоне температур 1.6-2 К.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, и сделаны выводы.

В качестве **замечаний** следует отметить следующее:

1) В работе впервые проведено детальное исследование явления осаждения атомов электродов и конструктивных элементов на поверхности пылевых частиц в плазме, получены данные о массовой доле атомов различных материалов в зависимости от времени горения разряда, получены данные о структуре осажденных атомов на поверхности пылевой частицы и модификации поверхности пылинок под воздействием плазмы разряда. Но приведенные данные о массовой доле атомов металла на пылинках на основе элементарных оценок позволяют получить значения концентрации атомов и ионов примеси в объеме и сравнить их параметрами рабочего газа. Это было необходимо сделать.

2) В дополнение к предыдущему замечанию. В Табл. 2.1 на стр.46 приведено, что массовая доля железа после 30 минут составляет полтора процента, через час – один процент, а через шесть часов – два с половиной процента. Как и почему такое может быть? По меньшей мере, следовало бы обратить внимание на такую аномалию и если не объяснить, то хоть как-нибудь прокомментировать это. Кроме того, в таблице приведено, что массовая доля серы составляет 0.4% для любого времени экспонирования – на это тоже следовало, наверное, обратить внимание и хоть как-то пояснить.

3) В Табл. 2.2 на стр.46 приведено значение массовой доли меди 85% в исходном случае (до обработки), когда медь покрывает десятимикронную пылинку из меламина слоем толщиной всего лишь 0.2 мкм. Это указывает на то, что определяется массовая доля лишь в каком-то приповерхностном слое пылинки, необходимо было уделить какое-то внимание этому вопросу. Кроме того, значения массовой доли различных примесей во второй строке этой таблицы должны совпадать со значениями в последней строке предыдущей таблицы. Однако для меди они различаются даже в первой значащей цифре. В чем причина?

4) В описании постановки экспериментов в емкостном высокочастотном разряде указано, что давление в экспериментальной камере поддерживалось непрерывной подачей рабочего газа. Очевидно, что в условиях, когда атомы распыленных конструктивных элементов (железо, алюминий и медь) сильно влияют на состав пылевых частиц, подвергшихся обработке, скорость прокачки рабочего объема чистым газом (аргоном) газа должна оказывать сильное влияние на экспериментальные результаты.

5) В работе показано, что в зависимости от времени экспозиции в пылевой структуре идет модификация поверхности частиц из-за присутствует легко ионизируемая примесь. Какое влияние она оказывает на взаимодействие между частицами в пылевой структуре.

6) По криогенному разряду не указано, была ли прокачка газа и исследовался состав наночастиц, вполне возможно, что они представляют собой кластеры атомов распыленных электродов, поскольку у металлов высокая поляризуемость и конверсия в молекулярные ионы может быть весьма высока.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и являются скорее следствием исключительно высокого интереса к очень оригинальной экспериментальной работе и не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертационная



работа Кононова Евгения Александровича выполнена на высоком научном уровне и вносит большой вклад в область исследования активных броуновских частиц, а именно сильновзаимодействующих макрочастиц, формирующих упорядоченные структуры в газоразрядной плазме, в том числе при температурах сверхтекучего гелия. Автореферат отражает содержание диссертации правильно и полно.

**Научная и практическая значимость работы.** Исследования, представленные в диссертационной работе, затрагивают сразу несколько областей науки, такие как: физика пылевой и низкотемпературной плазмы, физика газового разряда, химия полимеров и материаловедение. 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. Модификация приводит к развитию у частиц уникальных функциональных свойств поверхности и состава, которые могут быть использованы как в медицинских и технических целях (адресная доставка лекарств и создание порошковых основ для композитных материалов), так и в научных (создание активных янус-частиц для изучения самоорганизации в коллоидных и плазменно-пылевых системах).

Представляется целесообразным использование результатов настоящей работы в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Объединенный институт высоких температур РАН», Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН», Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН» и других научных организациях.

**Публикации и личный вклад автора.** Автором совместно с соавторами опубликовано 9 печатных работ в ведущих зарубежных и российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК. Диссертационная работа обобщает результаты, представленные в научных публикациях автора. Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены из проведенных автором экспериментов. На основании проведенных исследований и анализа полученных результатов были сформулированы и обоснованы выводы и положения, вошедшие в диссертацию.

**Достоверность результатов и апробация работы.** Представленные в данной диссертационной работе результаты экспериментальных исследований с высокой точностью воспроизводятся в многочисленных экспериментах и согласуются с результатами численных исследований и теоретическими предсказаниями других авторов.

Результаты исследований многократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях с международным участием

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 07.06.2021 г.), а ее автор Кононов Евгений Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Диссертационная работа была обсуждена и одобрена на заседании № 1595 семинара им. А.А. Рухадзе теоретического отдела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» 16 ноября 2022 г. Отзыв составлен главным научным сотрудником теоретического отдела ИОФ РАН, доктором физико-математических наук, профессором А.М. Игнатовым, обсужден и одобрен на расширенном заседании Ученого совета теоретического отдела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» с приглашением специалистов из отдела физики плазмы ИОФ РАН № 10 от 07 декабря 2022 г.

Главный научный сотрудник теоретического отдела ИОФ РАН,  
д.ф.-м.н., проф. Игнатов Александр Михайлович  
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, (499) 135-02-47, aign@fpl.gpi.ru

«07» декабря 2022 г.

  
А. М. Игнатов

Зав. отделом теоретического отдела ИОФ РАН,  
д.ф.-м.н., проф. Намик Гусейнага оглы Гусейн-заде  
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, (499) 135-02-47, namik@fpl.gpi.ru

«07» декабря 2022 г.

  
Н.Г. Гусейн-заде

Секретарь Ученого совета теоретического отдела ИОФ РАН,  
д.ф.-м.н., Василий Вячеславович Стрелков  
119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, (499) 135-02-47, strelkov.v@gmail.com

«07» декабря 2022 г.

  
В.В. Стрелков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) 119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, (499) 503-87-34, office@gpi.ru