

ОТЗЫВ

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

Диссертация Кононова Евгения Александровича посвящена экспериментальному изучению динамики активных броуновских частиц в пылевой плазме, формирующих упорядоченные структуры в приэлектродной области высокочастотного емкостного разряда и в стратах положительного столба тлеющего разряда постоянного тока, в том числе при температурах сверхтекучего гелия.

Активное броуновское движение как объект исследования вызывает большой интерес не только в физике, но и в биологии, медицине, материаловедении. В то время как пассивные броуновские частицы находятся в тепловом равновесии с окружающей средой, активные броуновские частицы способны поглощать энергию из окружающей среды и превращать ее в свою кинетическую энергию, которая выводит их из термодинамического равновесия. Динамика и самоорганизация в таких системах, влияние внешних факторов на них представляются перспективными для исследовательских работ. Сферы применения активных броуновских частиц разнообразны: например, разрушение вредных веществ в окружающей среде, контроль потоков вещества в миниатюрных устройствах, целевая доставка лекарства или микроустройства к больным органам, при разработке каталитических нано- и микромоторов и многие другие. Изучение явлений, связанных со 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 мягкой материи. Таким образом, диссертационная работа Кононова Е.А. представляется актуальной и важной как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения.

Диссертационная работа Кононова Е.А. состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 106 страниц, включая 34 рисунка, 3 таблицы и список цитируемой литературы, содержащий 153 наименования.

Во **Введении** автором обосновывается актуальность и выбор темы диссертации, формулируется цель и задачи работы, отмечаются ее научная новизна и практическая значимость, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** представлена общая информация об активном броуновском движении частиц в коллоидных растворах. Краткому обзору активного броуновского движения частиц в пылевой плазме и явлению фотофореза, приводящего к повышению «кинетической температуры» частиц, посвящен раздел 1.4.

Во **Второй главе** представлены результаты экспериментального изучения лазерно-индуцированного активного броуновского движения частиц, модифицированных в плазме

ёмкостного ВЧ разряда. Для выполнения работы модернизирован экспериментальный стенд для захвата частиц из плазменно-пылевой структуры, левитирующей в плазме ВЧ разряда. Впервые экспериментально исследована модификация частиц (формирование у частиц металлического покрытия) для создания нового объекта исследования – Янус-частиц. В результате осаждения продуктов эрозии электродов на поверхность и образования металлической островковой пленки макрочастицы в пылевой структуре могли эффективно поглощать лазерное излучение, что приводило к росту их кинетической энергии. Экспериментально обнаружено, что увеличение мощности воздействующего лазерного излучения на монослой из модифицированных частиц меламина-формальдегида приводит к увеличению среднего квадратичного смещения движущихся частиц. Предложено объяснение структурного перехода и возникновения активных свойств частиц с модифицированной поверхностью при воздействии лазерного излучения с учетом роли фотофоретической силы в движении макрочастиц. Сделан вывод о том, что после экспонирования частиц меламина-формальдегида в плазме ВЧ-разряда в течение 90 минут воздействие лазерного излучения приводило к увеличению кинетической энергии макрочастиц, и в монослое наблюдался структурный переход. Приведена оценка изменения температуры модифицированных пылевых частиц при воздействии лазера.

В **Третьей главе** приведены результаты экспериментального исследования динамики активных броуновских частиц в цепочечных структурах, сформированных в плазме тлеющего разряда постоянного тока при комнатной температуре. Впервые экспериментально изучен характер движения частиц с металлическим покрытием в плазменно-пылевой структуре и их активные свойства и структурные характеристики в широком диапазоне мощности воздействующего лазерного излучения. Показано, что частицы с металлическим покрытием проявляют активные свойства, и их активность растет с увеличением мощности лазерного излучения. Показано наличие структурного перехода «кристалл-жидкость» в плазменно-пылевой структуре модифицированных частиц при воздействии лазерного излучения. Для анализа структурных переходов применялся подход, основанный на расчёте динамической энтропии открытой диссипативной системы взаимодействующих частиц. В результате анализа динамических характеристик автором показано, что для цепочечных структур активных броуновских частиц наблюдались изменения локализации и рост активности макрочастиц по мере увеличения интенсивности разогревающего лазерного излучения. Отмечается, 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 благодаря активности частиц.

Впервые экспериментально исследованы плазменно-пылевые структуры в тлеющем разряде постоянного тока в трубке, охлаждаемой сверхтекучим гелием при температуре 1.6 К. Автором изучены мультимодальные пылевые структуры, образованные полидисперсными частицами диоксида церия с их наложением на облако синтезированных наночастиц и твердых спиральных волокон, в диапазоне температур 1.6 - 2 К. Приведены оценки зарядов для наночастиц, микроскопических частиц CeO_2 и

твердых волокон, находящихся в хорошем согласии с наблюдениями взаимодействия частиц оксида церия с наночастицами и волокнами.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

К диссертации Кононова Е.А. имеется ряд вопросов и замечаний:

1. Диссертационная работа Кононова Е.А. связана с изучением активных частиц в пылевой плазме, а литературный обзор в Главе 1 посвящен, главным образом, активным частицам в коллоидных растворах. Несмотря на общеизвестные аналогии между этими системами, имеются и очевидные различия, и стоило бы увидеть более подробный обзор по исследованиям активных броуновских частиц в пылевой плазме.
2. В диссертации не приведена формула для фотофоретической силы, играющей центральную роль в рассматриваемых явлениях, не приводится её оценка и сравнение с другими силами в пылевой плазме. Кроме того, в работе употребляются различные термины: «радиометрическая», «фотофоретическая» и «фотометрическая» силы, в качестве силы воздействия лазерного излучения на пылевые частицы.
3. Из текста диссертации непонятно, усреднялись ли данные по всему ансамблю пылевых частиц при определении среднеквадратичного отклонения траекторий частиц в зависимости от времени в ВЧ разряде, Рис. 2.9.
4. Как влияет характер реального трехмерного движения пылевых частиц на такие характеристики, как среднеквадратичное отклонение и линейное смещение? Если в монослое пылевых частиц в ВЧ разряде можно говорить о двумерном движении частиц, то как происходит движение активных частиц в пылевом облаке в страте разряда постоянного тока?
5. В работе наблюдался структурный переход «кристалл-жидкость» в квазидвумерной плазменно-пылевой структуре. Известны работы, описывающие сценарии такого перехода с появлением промежуточного стационарного состояния – «гексатической фазы». Наблюдалось ли данное явление?

Приведённые замечания не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой диссертации. Выполнен большой объем работ, результаты опубликованы в девяти работах в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах. Апробация проведена более чем на 10 российских и международных конференциях. Исследования в рамках диссертационной работы поддержаны грантом РФФИ № 20-32-90039, стипендией Президента Российской Федерации для поддержки молодых ученых СП-5688.2021.1. Диссертация Кононова Е.А. представляет завершённое научное исследование, которое вносит заметный вклад в развитие физики пылевой плазмы.

Практическая значимость работы определяется большим потенциалом для использования полученных результатов в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе,

Объединенном институте высоких температур, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», МГУ им. М.В. Ломоносова, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Московском физико-техническом институте, Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» и в других научных организациях, проводящих исследования в области физики пылевой плазмы.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.3.9 – Физика плазмы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Кононов Евгений Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Главный научный сотрудник Лаборатории разреженных газов 4.1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИТ СО РАН) д.ф.-м.н., Ст.н.с., профессор кафедры Физики неравновесных процессов Физического Факультета Новосибирского Государственного Университета.



Сухинин Геннадий Иванович

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1, тел.: 8 (961) 225-52-65,
e-mail: sukninin@itp.nsc.ru

Подпись Г.И. Сухинина заверяю:

Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.



Макаров Максим Сергеевич

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1, тел.: +7(383) 330-60-44,
e-mail: sci_it@itp.nsc.ru