

УТВЕРЖДАЮ

Научный руководитель АО «Государственный научный центр  
Российской Федерации Троицкий институт  
инновационных и термоядерных исследований»

д.ф.-м.н., профессор Черковец В.Е.



*Черковец В.Е.*  
(подпись)

« 15 » 11 2023 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Саметова Эдуарда Александровича «Спектральная плотность случайных процессов и межчастичное взаимодействие в комплексной плазме», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Диссертация Саметова Э.А. направлена на исследование сил межчастичного взаимодействия в пылевой плазме с применением нового метода, основанного на анализе спектрального отклика на стохастические процессы. Актуальность этих исследований связана с тем, что глубокое понимание процессов в пылевой плазме имеет важное значение не только для развития науки о сложных открытых диссипативных системах, но и для решения ряда практических задач. Пылевая или комплексная плазма, находящая применение в микроэлектронике, при разработке ускорителей и плазменных реакторов, в технологиях производства наночастиц с новыми уникальными свойствами и т.д., является сложным объектом для изучения. Новый метод, представленный в работе, не только способствует более полному научному пониманию происходящих в сложных диссипативных системах процессов, но и позволяет наглядно продемонстрировать причины самоорганизации заряженных частиц в упорядоченные структуры в комплексной плазме. Кроме того, этот метод позволяет определить критерии конфигурационной устойчивости в таких системах. Представленная работа выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты, несомненно, представляют интерес для научной общественности.

Диссертация состоит из 5 основных глав, введения, заключения и списка литературы. Общим объемом работы составляет 142 страницы, из них 127 страницы текста и 15 страниц списка литературы, состоящего из 249 ссылок.

Во введении показана актуальность темы исследования, изложены цели и задачи работы, новизна, теоретическая и практическая значимости полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, приведена информация об апробации результатов, описан личный вклад автора.



В первой главе представлена общая информация и вводятся основные понятия пылевой (комплексной) плазмы. Обзор охватывает темы, связанные с процессами зарядки микрочастиц и электростатическим потенциалом как в изотропной, так и анизотропной плазме. В тексте подробно излагаются различные силы, действующие на пылевые частицы в газоразрядной плазме. Также рассматриваются механизмы взаимодействия между частицами. Кроме того, проводится детальное рассмотрение существующих методов анализа взаимодействия между частицами в пылевой плазме.

Во второй главе представлены полученные автором аналитические выражения для спектральной плотности случайных процессов в обобщённой линейной системы связанных осцилляторов и рассмотрено влияние основных параметров системы на спектральную плотность. Подробно рассмотрены спектральные плотности для вертикального расположения пары частиц, цепочечных структур и квазидвумерных кластеров. Результаты численного моделирования подтверждают выводы, сделанные на основе применения аналитических методов.

В третьей главе предложен и проверен новый бесконтактный экспериментальный метод, основанный на анализе спектральной плотности случайных процессов, позволяющий восстановить параметры плазменно-пылевой системы. Для работы данного метода не требуются внешние возмущения системы и специальная модификация конструкции экспериментальной установки, проведение предварительных измерений и предположения о внешних полях, о типе взаимодействия, о размере частиц. Проведённое сравнение данного метода с другими бесконтактными методами показало значительные преимущества предложенного метода особенно при работе с данными, имеющими значительную погрешность измерения.

В четвертой главе представлены новые данные о нарушении взаимного характера взаимодействия в цепочечных структурах пылевых частиц в экспериментах в высокочастотном газовом разряде емкостного типа и в стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока. Предложенный метод позволил определить производные сил взаимодействия и сил удерживающих полей, коэффициенты трения и характеристики источников кинетической энергии частиц как функции параметров экспериментов. Также был отмечен процесс снижения заряда нижней частицы в структуре. Было получено, что небольшие пространственные флуктуации заряда частиц могут значительно влиять на силу их взаимодействия. Кроме того, исследована устойчивость вертикальных пар частиц в различных конфигурациях, включая случаи частиц с взаимно равными и неравными по абсолютной величине силами взаимодействия. Полученные результаты были использованы для экспериментальной проверки аналитических критериев устойчивости.

В пятой главе продемонстрированы результаты исследования диффузии, спектральных характеристик ограниченных систем заряженных броуновских частиц в присутствии магнитного поля. В главе представлены результаты как аналитического, так и численного анализа систем частиц в разнообразных электрических полях. Показано, что для рассматриваемых систем коэффициент диффузии в магнитном поле соответствует формуле Таунсенда. Также представлены аналитические методы оценки эффективного радиуса разлета частиц. В дополнение к этому, глава включает аналитическое и численное исследование динамики кластеров заряженных частиц в условиях удерживающего силового поля при воздействии магнитного поля. Рассматриваются спектральные и структурные характеристики этих систем, а также их зависимость от температуры и количества частиц.



По диссертации возникли следующие замечания:

- 1) В диссертационной работе делается предположение, что «анизотропия взаимодействия может происходить как из-за анизотропии плазмы, так и из-за асимметрии формы микрочастиц и неоднородного распределения заряда по их поверхности». Нужно отметить, что асимметрия формы микрочастиц и неоднородное распределение заряда по их поверхности сами по себе не могут приводить к анизотропии взаимодействия.
- 2) По 6-й задаче нужно отметить, что электромагнитное поле не бывает постоянным. Автор, наверно, имел ввиду постоянные электрическое и магнитное поля.
- 3) Возникает вопрос по поводу возможности восстановления потенциала сил, действующих на частицы, предложенным автором методом, который относится к некорректно поставленным задачам, что, кстати, в диссертационной работе вообще не обсуждается. Автором обнаружено, что даже небольшие, порядка 0.1–1%, пространственные флуктуации заряда одной частицы могут привести к значительному изменению измеряемой производной межчастичной силы. Известно, что в плазме заряд частиц флуктуирует и амплитуда флуктуаций примерно описывается зависимостью  $(0.5|Z|)^{1/2}$  ( $Z$  – заряд частицы в элементарных зарядах), что приводит заметно более высоким флуктуациям заряда по сравнению в вышеприведенными 0.1–1%. Это, казалось бы, делает предложенный метод весьма неточным.
- 4) Используемый автором термин «эффект разрядки» к эффекту уменьшению заряда нижней частицы кажется неудачным. Заряд нижней частицы (как и других) полностью определяется параметрами плазмы в области ее левитации и никакой разрядки ее заряда не происходит.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением свойств систем заряженных частиц, пылевой, коллоидной плазмы. В работе представлено решение ряда актуальных задач, которые могут использоваться для дальнейшего развития теоретических моделей. Результаты работы целесообразно использовать в Институте космических исследований РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, 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.

Результаты диссертационной работы хорошо известны специалистам, докладывались на 18 российских и международных конференциях, опубликованы в 13 статьях в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации. Личный вклад Саметова Э.А. явно обозначен в работе и не вызывает сомнений.

Диссертация обсуждена и одобрена на заседании секции №6 «Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования физических процессов в плазме и твердых телах» Научно-технического совета АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ" (протокол №35 от 14 ноября 2023 года). Отмеченные недостатки не снижают общую высокую оценку полученных результатов и могут рассматриваться как рекомендации. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию. Научный уровень работы безусловно высокий и вносит заметный вклад в физику пылевой плазмы и физику плазмы в целом. 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., а ее автор Саметов Эдуард Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Отзыв составил:

Начальник отдела физики неидеальной плазмы  
отделения Центр теоретической физики и  
вычислительной математики АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ",  
д.ф.-м.н. Трушкин Николай Иванович  
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, тел.: 8(495) 851-04-46,  
trushkin@triniti.ru



Н.И. Трушкин

Директор отделения Центр теоретической физики и  
вычислительной математики АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ",  
председатель секции №6 НТС АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ",  
к.ф.-м.н.



Д.В. Высоцкий

Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
к.ф.-м.н.



А.А. Ежов

14 ноября 2023 г.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, тел.: +7(495)841-53-09, сайт: <https://www.triniti.ru/>, e-mail: [liner@triniti.ru](mailto:liner@triniti.ru)