

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Гаврикова Андрея Владимировича** «Плазменно-пылевые структуры при внешних воздействиях: зарядка макрочастиц, их динамика и явления переноса», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы

В работе экспериментально исследуется широкий круг вопросов, связанных с изучением поведения плазменно-пылевых структур при различных видах внешних воздействий.

Актуальность темы. Физика пылевой плазмы, представляющей собой плазму, содержащую заряженные макроскопические частицы, интенсивно развивается в последние десятилетия. Это обусловлено, прежде всего, фундаментальным характером наблюдаемых явлений. Пылевая плазма демонстрирует свойства, качественно отличные от свойств известных сред, что позволяет говорить, фактически, о новом состоянии вещества. Исследование этих свойств является существенным вкладом в создание новых научных направлений в различных областях физики: гидродинамике, термодинамике открытых систем, кинетике фазовых переходов, нелинейной физике, физике твердого тела и даже в астрофизике. Другим аспектом этих работ является их важное прикладное значение. Пылевая плазма широко распространена, и в природных объектах, таких как пылевые и газовые скопления в атмосфере планет и межзвездном пространстве, и часто наблюдается в лабораторных условиях, начиная от термоядерных установок и заканчивая технологиями плазменного напыления, производства наночастиц и др. Исследования такой плазмы интенсивно развиваются в ведущих мировых научных центрах: Max-Planck-Institute of Experimental Physics, Los Alamos National Laboratory и др. Несмотря на то, что многие фундаментальные аспекты физики пылевой плазмы были успешно развиты в обширных исследованиях последних десятилетий, глубина и объем этой проблемы оставляют широкое поле для дальнейших исследований. Поэтому круг задач, решаемых в данной работе, связанных с изучением явлений самоорганизации и динамики плазменно-пылевых структур, а также процессов, протекающих в таких структурах при различных внешних воздействиях, представляется чрезвычайно актуальным.

Диссертация **состоит** из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 182 страницы, включая 85 рисунков, 6 таблиц и библиографию из 136 наименований на 14 страницах.

Во **Введении** автор дает краткий исторический обзор исследований по теме диссертации, на основании которого дано обоснование актуальности темы исследования, формулируются основные цели и задачи работы, определена научная новизна полученных в работе результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена краткая аннотация диссертационной работы.

Глава 1 носит вводный характер и знакомит с основными представлениями физики пылевой плазмы и используемым в работе методам исследования плазменно-пылевых структур. Указаны особенности диагностирования такой сложной многокомпонентной системы, требующей для своего описания помимо традиционных плазменных параметров (температуры и концентрации электронов и ионов, степени ионизации и др.) также характеристики, описывающие динамические и структурные свойства пылевой компоненты. К ним, прежде всего, относятся кинетическая температура макрочастиц и параметр неидеальности, представляющий собой отношение потенциальной энергии взаимодействия двух макрочастиц плазменно-пылевого образования к их кинетической энергии. Значительное внимание уделяется методам измерения и анализу результатов экспериментальных исследований различных типов корреляционных функций, которые являются важнейшими характеристиками такой сильнонеидеальной среды, как пылевая плазма.

В **Главе 2** представлены результаты экспериментальных исследований механических, т.е. вязкостных характеристик плазменно-пылевой жидкости, а также вязко-пластичных характеристик плазменно-пылевого кристалла. Сдвиговые напряжения в исследуемом объекте создавались путем воздействия на локальную область лазерным лучом, энергия которого варьировалась в широком диапазоне значений. Из полученных экспериментальных результатов сделан вывод о пороговом характере зависимости течения от мощности лазерного пучка. Получены зависимости коэффициента сдвиговой вязкости от прикладываемого касательного напряжения. Установлен неньютоновский характер этой зависимости, который связывался с наличием в плазменно-пылевой среде групп (кластеров) макрочастиц,двигающихся коррелированным образом.

Исследованию процессов теплопереноса, в частности, определению коэффициентов теплопроводности и температуропроводности в плазменно-пылевых образованиях, посвящена **Глава 3**. Локальные области повышенной температуры создавались различными способами, а определение коэффициентов теплопереноса осуществлялось тремя независимыми методиками. В частности, локальный нагрев плазменно-пылевого облака

электронным пучком позволил получить зависимости коэффициентов теплопроводности и температуропроводности плазменно-пылевой структуры от температуры в широком диапазоне параметров неидеальности. Отмечается также, что найденные зависимости согласуются с результатами численного моделирования, выполненного для простых одноатомных жидкостей.

Глава 4 посвящена изучению процессов, протекающих при фотоэмиссионной зарядке плазменно-пылевого облака под действием УФ излучения. Показано, что под действием излучения порядка 90% пылевых макрочастиц приобретало положительный заряд, а около 10% — отрицательный, причем приобретаемый положительный заряд пылевой частицы составил около 530 элементарных зарядов на микрон радиуса, а отрицательный - около 100 элементарных зарядов. Полученный результат связывался с различием эффективности квантового выхода в системах полидисперсных макрочастиц.

В Главе 5 приведены результаты экспериментальных исследований воздействия пучка электронов кэВ энергий на пылевые образования. Продемонстрирован эффект сверхвысоких значений заряда, приобретаемого пылевыми частицами при прямом воздействии электронного пучка, который достигал величины $106e$ для частицы микронных размеров, что более чем на два порядка превышает типичные значения заряда для аналогичных пылевых частиц, находящихся в равновесной газовой плазме тлеющего разряда.

Наконец, **Глава 6** посвящена рассмотрению отклика плазменно-пылевой системы на возмущение, создаваемое лазерным пучком, действующим на *отдельную* частицу. Обнаружено, что в результате такого воздействия возникают незатухающие колебания этой макрочастицы. Отмечается, что поскольку в установившемся автоколебательном режиме должна осуществляться компенсация диссипированной в процессе движения частицы энергии, необходим канал поступления энергии из внешнего источника. В качестве такого источника предложен механизм коллективного взаимодействия колеблющейся частицы с ансамблем пылевых частиц.

Отметим научную новизну и ценность наиболее существенных результатов, полученных автором диссертации, их фундаментальное и прикладное значение для науки и производства.

1. Прежде всего, укажем на существенный вклад результатов исследования в понимание фундаментальных процессов, протекающих в различных сильнонеидеальных системах, как наблюдаемых в природных условиях (плазменно-пылевые образования в атмосферах планет, вблизи поверхности космических тел и т.п.), так и исследуемых в научных

лабораториях (жидкости различной степени упорядоченности, вигнеровские кристаллы в ионных ловушках, структуры электронов на поверхности жидкого гелия и др.)

2. Работа также имеет весьма серьезное методическое значение. Автором представлены оригинальные методики исследования такого сложного многокомпонентного объекта, каким являются плазменно-пылевые структуры. Отметим лишь некоторые из них: выполнена верификация бесконтактного метода диагностики важнейшей характеристики такой структуры – эффективного параметра неидеальности; экспериментально получены трехчастичные корреляционные функции для макрочастиц в пылевой плазме; разработан новый метод, позволяющий диагностировать коэффициент вязкости плазменно-пылевых образований в широком диапазоне параметров неидеальности; предложен новый метод определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности для жидкостных пылевых структур и др. Эти методики очень важны для дальнейших экспериментальных исследований данного объекта.

3. С прикладной точки зрения результаты работы представляют несомненный интерес для создания плазменно-пылевых двигателей космических аппаратов, разработки новых композитных материалов, в частности катализаторов и лекарств с возможностью адресной доставки внутри организма, для каталитического ускорения скорости реакций с высоким энергетическим барьером, глубокой имплантации ионов, получения материалов с новыми поверхностными свойствами.

4. Важной особенностью диссертации являются экспериментально обнаруженные эффекты, демонстрирующие совершенно удивительные свойства плазменно-пылевых образований, убедительного объяснения которых на данном этапе исследований найти не удастся. К таким эффектам можно отнести, например, «газовое» поведение холодной части плазменно-пылевого облака и «жидкостный» характер его локально нагретой части, а также явление автоколебательного движения отдельных макрочастиц после кратковременного внешнего воздействия. Эти эффекты указывают на глубокий, фундаментальный характер протекающих в такой среде процессов и открывает широкие перспективы дальнейших исследований подобных сильнонеидеальных структур.

Обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы определяется следующими обстоятельствами. Поскольку регистрация процессов в исследуемом объекте представляет собой весьма непростую задачу, автор уделяет значительное внимание тщательному методическому обоснованию оригинальных

диагностических средств, используемых в данной работе. Важным достоинством работы, обеспечивающим достоверность результатов, является сочетание экспериментальных исследований с модельными расчетами. Здесь автор показал себя не только высококласным экспериментатором, но и специалистом широкого профиля, способным анализировать серьезные теоретические модели. Кроме того, достоверность результатов работы обеспечивается сопоставлением с данными других авторов. Особо следует отметить широкий набор оригинальных, разработанных автором, диагностических средств, используемых в экспериментах.

Как всякое серьезное научное исследование, диссертационная работа не свободна от **недостатков**.

Общее замечание по работе. Несмотря на то, что исследования пылевой плазмы ведутся уже не одно десятилетие и многие понятия и представления являются устоявшимися и общепризнанными, полагаю, что в данной работе было бы уместно хотя бы вкратце описать физические механизмы, обеспечивающие, при определенных условиях, самоорганизацию ансамбля пылевых частиц.

1. В качестве иллюстрации полезности такого описания отмечу, что в Главе 1 на рис. 1.11 приведены результаты измерения парных корреляционных функций пылевых частиц в разных экспериментальных условиях. Из рисунка следует, что увеличение давления буферного газа, примерно, в два раза приводит к росту почти в пять раз параметра неидеальности Γ^* . Необходимо пояснить возможные физические причины этого эффекта.

2. В Главе 2 исследовано течение пылевых частиц под действием лазерного излучения. Результаты, представленные на рис.2.5 и 2.6, кажутся противоречащими друг другу и требуют пояснения. Кроме того, следует обосновать вывод о пороговом характере течения (с.55) и приведенную здесь же величину пороговой мощности лазерного излучения. Показанный на рис.2а профиль скорости частиц демонстрирует заметные градиенты в области, где профиль лазерного пучка имеет плато, что ставит под сомнение упомянутый вывод. Рис.2.15 также демонстрирует отсутствие указанного порогового эффекта. Из рис. 2.16 без пояснений невозможно понять различие в изображениях с присутствием и отсутствием дислокаций.

Сделанный в этой главе важный вывод о том, что в области достаточно больших сдвиговых напряжений происходит разрыв внутрикластерных связей макрочастиц, что, в конечном счете, приводит к заметному уменьшению вязкости среды, не подтвержден экспериментально и требует обоснования.

3. Из рис. 3.6, где изображены корреляционные функции разных фаз плазменно-пылевой структуры, следует, что высокотемпературная фаза демонстрирует признаки жидкости, в то время как функция низкотемпературной фазы типична для газовой среды. Этот удивительный факт требует пояснений.

4. В Главе 4 обнаружен эффект зарядки пылевых частиц в результате фотоэлектронной эмиссии с поверхности частицы под действием УФ излучения. При этом возникают два вопроса. Во-первых, простейшие оценки показывают, что напряженность соответствующего электрического поля в окрестности частицы превышает 1кВ/см , и непонятно, почему в таком, достаточно сильном, поле не происходит нейтрализация заряда частиц плазменными электронами. Во-вторых, подобная, практически, униполярно заряженная пылевая подсистема под действием кулоновских сил, казалось бы, должна разлететься (аналогично «кулоновскому взрыву»). Следует пояснить, почему указанные эффекты не наблюдаются в эксперименте.

Отмеченные замечания носят, в основном, рекомендательный характер и не снижают, в целом, высокой оценки диссертационной работы. Оценивая работу в целом, укажем, что в ней проведены исследования широкого класса процессов в плазменно-пылевых структурах, что обеспечило серьезное продвижение в построении цельной физической картины явлений в сильнонеидеальных средах. О высоком уровне выполненных исследований свидетельствуют, в частности, многочисленные публикации в ведущих российских и международных физических журналах: ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Phys. Rev., Phys. Plasmas и др.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности

В диссертационной работе представлены результаты создания необходимой физической аппаратуры и широких экспериментальных исследований неидеальных плазменных структур. Большое внимание уделяется развитию экспериментальных методов исследований подобных структур. Проведен серьезный анализ результатов с привлечением современных теоретических моделей неидеальной плазмы.

В соответствии с паспортом специальности такие работы относятся к специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Заключение

Диссертационная работа А.В. Гаврикова выполнена на высоком научном уровне, является завершенным научным исследованием, результаты работы представляют весьма существенный вклад в развитие фундаментальных представлений и прикладных аспектов физики неидеальной плазмы. Научная ценность, практическая значимость, новизна и достоверность представленных в диссертации результатов несомненны. Совокупность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных автором диссертации, является вполне обоснованной. Автор является признанным специалистом в области плазменно-пылевых структур, результаты его исследований докладывались на престижных

международных конференциях, опубликованы в рейтинговых научных изданиях и широко известны мировой научной общественности.

Таким образом, диссертационная работа ««Плазменно-пылевые структуры при внешних воздействиях: зарядка макрочастиц, их динамика и явления переноса»», отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ, а ее автор Гавриков Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08-физика плазмы.

Официальный оппонент, заведующий кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», доктор физико-математических наук, профессор Паперный Виктор Львович.

664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1

Телефон: 8- (3952)-521-254; e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

15.04.2019 года, г.Иркутск

Паперный В.Л.

*Отзыв оригинального
эскиза, г.ф-м.н.,
профессора В.Л. Паперного
заведующего:*

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «ИГУ»

Н. Г. Кузнецова

