

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Гаврикова Андрея Владимировича

«Плазменно-пылевые структуры при внешних воздействиях:
зарядка макрочастиц, их динамика и явления переноса»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.08 — Физика плазмы

С конца XX века газоразрядная плазма, содержащая пылевые частицы, стала объектом обширных экспериментальных и теоретических исследований во многих ведущих научных лабораториях мира. Это было связано как с научным, так и практическим интересом к этому объекту. С научной точки зрения пылевая плазма представляет большой фундаментальный интерес, поскольку является удобной физической моделью для экспериментального и теоретического изучения различных проблем статистической физики, в частности, неидеальной плазмы. С практической точки зрения, возникновение пылевой компоненты в плазме может играть как положительную, так и отрицательную роль в различных плазмохимических процессах и технологиях. В таком случае возникает настоятельная необходимость в знаниях, позволяющих осмысленно и эффективно управлять пылевой компонентой при использовании комплексной плазмы в различных технологических процессах. Одним из методов направленного управления пылевой плазмой могут быть внешние воздействия, которые, к тому же, могут быть эффективным инструментом ее исследования. Цель диссертации Гаврикова А. В. как раз и состоит в изучении реакции плазменно-пылевых структур на внешние воздействия (исследование зарядки макрочастиц, их динамики под действием лазерного излучения и электронного пучка), а также исследование явлений переноса в пылевой подсистеме комплексной плазмы. С учетом вышесказанного, актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация изложена на 182 страницах и состоит из Введения, шести глав, Заключения и Списка литературы.

Во **введении** кратко, но ёмко изложено современное состояние дел в области пылевой плазмы и определены цели и задачи диссертационной работы, к числу которых автор относит изучение плазменно-пылевых структур при внешних воздействиях, исследование зарядки макрочастиц, их динамики, исследование явлений переноса в пылевой подсистеме комплексной плазмы.

В первой главе "*Плазменно-пылевые образования различной степени упорядоченности и диффузия в них*" даются основные характеристики сильнонеидеальных плазменно-пылевых систем, а также описываются экспериментальные методы их определения. Рассматриваются особенности диагностирования кинетической температуры макрочастиц, корреляционных функций и параметра неидеальности формирующихся в плазме пылевых структур, среднего межчастичного расстояния, а также определения коэффициента самодиффузии макрочастиц методом визуализации. Отмечены проблемы, возникающие при получении и обработке экспериментальных данных, связанные с частотой съемки и оптическим разрешением используемой аппаратуры. Проведена верификация методов обработки экспериментальных данных. Даны рекомендации для получения надежных экспериментальных данных и методов их корректной обработки.

Во второй главе "*Вязкопластические свойства пылевых структур в плазме газового разряда*" автор описывает идею предложенного им метода нахождения коэффициента сдвиговой вязкости плазменно-пылевой жидкости в плазме ВЧ-разряда при использовании лазерного воздействия в условиях, когда торможение макрочастицы о газовую среду осуществляется в молекулярном режиме. В этой же главе автор излагает выполненный им цикл исследований на основе предложенной идеи по разработке метода диагностики коэффициента вязкости плазменно-пылевых образований в широком диапазоне параметров неидеальности: от параметров, соответствующих слабокоррелированной жидкости, до параметров, отвечающих кристаллическим структурам. В итоге автором измерены характерные значения коэффициента. Кроме того, на основании проведенных исследований автором установлено неньютоновское поведение плазменно-пылевых жидкостей, выполнен анализ условий образования и роста в плазменно-пылевой жидкости кластеров, а также сделан вывод о роли кластеров в появлении значительной вязкости среды.

Третья глава "*Теплоперенос в плазменно-пылевых образованиях в газовых разрядах*" содержит результаты экспериментальных исследований процессов теплопереноса в жидкостных пылевых структурах. В этой главе автор дает описание использованного им метода восстановления коэффициентов теплопроводности и температуропроводности для жидкостных пылевых структур в стационарном и нестационарном процессе теплопереноса вследствие инициирования теплового возмущения, возникающего в пылевом облаке при небольшом изменении давления газа, мощности разряда или вследствие влияния электронного пучка. Важно отметить, что метод диагностики коэффициента теплопроводности плазменно-пылевой жидкости базируется на визуализации макрочастиц, позволяющей отслеживать скорости и координаты отдельных частиц структуры. В результате анализа стационарного и нестационарного процессов теплопереноса были восстановлены коэффициенты теплопроводности и температуропроводности для жидкостных пылевых структур. Получены температурные зависимости данных коэффициентов от кинетической температуры и параметра неидеальности, которые качественно согласуются с результатами численного моделирования. Проведен анализ возможных причин количественного отличия экспериментальных данных от расчетных, из которых наиболее вероятной автор указывает на диссипацию энергии пылевых частиц за счёт их столкновений с нейтральными частицами окружающего газа.

Четвертая глава "*Зарядка пылевых частиц под действием ультрафиолетового излучения*" посвящена изучению фотоэмиссионной зарядки конденсированной дисперсной фазы микронных размеров. Интерес к данному механизму зарядки автор обосновывает его важностью во многих процессах, происходящих в верхних слоях атмосферы, на поверхности космических тел, в том числе и лунной, и в космическом пространстве. Кроме того, исследования данного явления, по мнению автора, важны также для разработки средств управления поведением пылевых частиц в плазме ВЧ-разрядов и плазме тлеющих газовых разрядов постоянного тока в лабораторных условиях и в технологических процессах, использующих данные разряды. В этой главе описана разработанная автором методика облучения частиц ультрафиолетом, а также метод регистрации и обработки полученных экспериментальных данных. Автором обнаружен и исследован эффект двуполярной зарядки пылевых частиц, облучаемых ультрафиолетом, при которой, несмотря на преимущественный вылет электронов из частиц за счет фотоэмиссии, тем не менее, около 1/10 доли всех пылевых частиц получают отрицательный заряд. Получены усредненные количественные значения заряда облучаемых пылевых частиц и проанализированы причины наблюдаемого эффекта,

главной из которых, по мнению автора, может быть различие у частиц в величинах квантового выхода электронов под действием фотонов.

В пятой главе *"Воздействие пучка электронов кэВ энергий на пылевые образования"* описаны результаты воздействия пучка электронов с энергией 25–30 кэВ на плазменно-пылевые образования. Одной из причин, побудивших автора к проведению указанных исследований, явилась загадка наличия левитирующей лунной пыли на темной стороне Луны. При этом рабочая гипотеза состояла в том, что на темной стороне Луны главную роль в образовании пылевой плазмы и левитирующих пылевых скоплений может играть поток энергетичных электронов, облучающих Луну.

Для проведения намеченных исследований автором разработан и создан экспериментальный комплекс с использованием источника высокоэнергетических электронов на базе плазменного эмиттера. В итоге, изучена динамика движения заряженных пылевых частиц и продемонстрирована возможность сверхвысокой зарядки пылевых частиц при прямом воздействии на них высокоэнергетичного пучка электронов. Для частиц диаметром 100 мкм получено экстремально высокое значение заряда 5×10^7 элементарных зарядов. Выполненный автором анализ показал, что найденные из эксперимента значения заряда частицы оказались существенно меньше теоретически ожидаемого. Проанализированы возможные механизмы, влияющие на зарядку частиц, и высказана гипотеза, что малость полученного частицей заряда может быть объяснена частичной экранировкой пылевой частицы ионами плазмы, созданной вокруг частиц электронным пучком. Установлено, что нагрев пылевых частиц в области действия электронного пучка практически не влияет на величину приобретаемого ими заряда.

Шестая глава *"Динамика частиц плазменно-пылевой структуры при воздействии лазерного излучения на отдельную частицу"*, по сути, относится к циклу исследований динамики пылевых частиц при воздействии лазерного излучения. Материал этой главы посвящён более детальному рассмотрению отклика плазменно-пылевой системы на возмущение, создаваемое лазерным лучом, действующим на отдельную частицу в упорядоченной структуре. В эксперименте использовались графитовые пылинки, которые зависали в приэлектродном слое ВЧ-разряда и формировали монослойную жидкостную плазменно-пылевую структуру. Воздействие на отдельную пылевую частицу осуществлялось единичным импульсом сфокусированного излучения аргонового лазера длительностью около 1с. Воздействие лазера на частицу вызывало её отклонение от равновесного положения и инициировало незатухающие колебания в вертикальном направлении. Выполнены оценки сил эффективного межчастичного взаимодействия при наличии колебаний. Указано на важную роль обмена энергией между вертикальным и горизонтальным движением пылевых частиц, при котором поддержание автоколебаний отдельной частицы возможно за счёт резонансной перекачки кинетической энергии хаотического движения пылевых частиц плазменно-пылевой структуры в энергию вертикальных колебаний.

Проведены эксперименты по созданию единичной вакансии в плазменно-пылевой кристаллической структуре и изучению динамики пылевых частиц вблизи неё. Вакансия генерировалась при помощи воздействия лазерного пучка на отдельную частицу по схеме, аналогичной описанной выше. По измеренным ускорениям пылевых частиц оценена сила их эффективного взаимодействия.

В Заключении автор приводит основные результаты и выводы диссертационной работы.

По содержанию диссертационной работы А. В. Гаврикова имеются следующие замечания:

1. Требуется пояснение большого различия экспериментально полученных значений кинетической температуры частиц в примерах на рисунке 1.6 (300 К и 4 500 К). Какие условия эксперимента на это повлияли?
2. На рисунке 2.5 перепутаны значения мощностей лазерного луча для соответствующих кривых распределения дрейфовой скорости макрочастиц вдоль радиуса.
3. Не уделено достаточного внимания вопросу нагрева пылевых частиц электронами кэВ энергий. Какие соображения/основания были для этого?
4. Полученное значение коэффициента теплопроводности плазменно-пылевой жидкости $(1-4) \cdot 10^{-14}$ эрг/(с·см·К)) приведено почему-то не в единицах общепринятой системы СИ (Вт/(м·К)), но в единицах старой системы СГС (эрг/(с·см·К)).

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки приведенных в диссертации научных результатов. Диссертация А. В. Гаврикова представляется законченным научным исследованием, содержит совокупность новых научных результатов, имеет внутреннее единство.

Научная новизна результатов, изложенных в диссертации, обусловлена не только тем, что они являются пионерскими, но и тем, что они получены впервые с высоким качеством на уникальных установках с использованием оригинальных методов диагностики.

Практическая значимость работы определяется большим количеством новых экспериментальных результатов, среди которых стоит отметить полученные данные о коэффициенте диффузии макрочастиц, коэффициенте сдвиговой вязкости, коэффициентах теплопроводности и температуропроводности для плазменно-пылевых структур в указанных диапазонах параметров. Подробное описание как самих данных, так и методов их получения дает возможность их практического использования в научных организациях, проводящих исследования в области физики пылевой плазмы. Результаты диссертации могут быть применены при построении и валидации физических моделей сильнонеидеальных систем, а также для развития бесконтактных методов диагностики пылевой плазмы с использованием внешних локальных воздействий, таких как лазерное или электронно-пучковое. Кроме того, полученные результаты могут быть полезными и для других практических применений, например, при создании плазменно-пылевых двигателей космических аппаратов, при разработке новых композитных материалов, но и не только.

Результаты диссертационной работы широко известны специалистам в области физики пылевой плазмы, докладывались на многих международных и российских конференциях, научных семинарах. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 25 рецензируемых статьях в зарубежных и ведущих отечественных журналах по тематике диссертационной работы. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации. Личный вклад А. В. Гаврикова представляется определяющим, все основные результаты диссертации получены лично им или при его непосредственном участии. Научные положения, выносимые на защиту, хорошо обоснованы и достоверны.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики плазмы и физики фазовых переходов. Она соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от

24.09.2013 г. (в редакции от 01.10.2018), а ее автор, Андрей Владимирович Гавриков, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 —«Физика плазмы».

Даю свое согласие на обработку персональных данных.

Начальник лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика и химия плазмы, профессор



Юрий Семенович Акишев

Дата: 19 апреля 2019 г.

108840, Россия, г. Москва, г. Троицк,
Акционерное Общество "Государственный Научный Центр Российской Федерации
Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований" (АО "ГНЦ РФ
ТРИНИТИ"),
ул. Пушкиных, владение 12.
Телефон: 8 495 841 5236;
e-mail: liner@triniti.ru;
website: <http://www.triniti.ru>

Подпись Акишева Юрия Семеновича заверяю:

Ученый секретарь Акционерного Общества "Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований" (АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ") Телефон: 8 495 8518827

кандидат физико-математических наук Александр Александрович Ежов

