

## 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

Начало активных исследований пылевой плазмы было связано с развитием ряда практических приложений, таких как электродинамика продуктов сгорания ракетных топлив, электрофизика магнитогидродинамических генераторов, с использованием технологий плазменного напыления и травления в микроэлектронике, развитием производства тонких пленок и наночастиц и др. Пыль и пылевая плазма широко распространена в космосе (межзвездные и межпланетные облака, хвосты комет, планетарные кольца и т.д.), а также играют заметную роль в процессах, протекающих в верхних слоях атмосферы. Пылевая плазма обнаружена вблизи искусственных спутников земли и в пристеночной области установок управляемого термоядерного синтеза. Наличие макроскопических частиц может существенно влиять на свойства низкотемпературной плазмы. Пылевые частицы, находящиеся в плазме, приобретают электрический заряд и представляют собой дополнительную заряженную компоненту, наличие которой существенным образом сказывается на коллективных процессах в плазме. В диссертационной работе А. В. Гаврикова исследуются плазменно-пылевые структуры различной степени упорядоченности при внешних воздействиях. Как выбранная тематика, так и объекты и методы исследования является новыми и востребованными, что действительно определяет актуальность представленной автором работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 182 страницы, включая 85 рисунков, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 136 наименований, содержащий 28 публикаций автора по теме диссертации.

**Первая глава** посвящена особенностям диагностирования таких параметров упорядоченных плазменно-пылевых структур как кинетическая температура макрочастиц, корреляционные функции и параметр неидеальности пылевых структур. В данном разделе рассматривается самодиффузия макрочастиц, а также описывается выполненная верификация ряда диагностических методов.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментального исследования лазерного воздействия на плазменно-пылевые структуры, при помощи которого в плазменно-пылевой жидкости, а также плазменно-пылевых кристаллах создавались направленные течения. Предложены методы, позволяющие на основе полученных экспериментальных данных находить коэффициент сдвиговой вязкости плазменно-пылевых структур различной степени упорядоченности. Показано, что для слабокоррелированных систем коэффициент сдвиговой вязкости практически не зависит от величины касательного напряжения, в то время как для более упорядоченных систем с увеличением касательного напряжения сдвиговая вязкость падает.

**В третьей главе** экспериментально исследованы кинетические процессы переноса тепла в плазменно-пылевые структуры, в которых внешним воздействием создавались локально более нагретые области. Получены зависимости коэффициентов теплопроводности и температуропроводности от температуры и параметра неидеальности. Выполнено сравнение с результатами численного моделирования простых одноатомных жидкостей.

**В четвертой главе** приводятся данные экспериментального исследования фотоэмиссионной зарядки взвеси пылевых частиц при атмосферном давлении. Показано, что происходит дипольная зарядка, объясняющаяся возникновением фотоэмиссионной плазмы, в которой у частиц с разными эффективностями квантового выхода появляется разный заряд.

**Пятая глава** посвящена экспериментальному воздействию пучка электронов кэВ энергий на пылевые образования. Исследована динамика движения пылевых частиц и механизм зарядки. Продемонстрирован заряд частиц более чем на два порядка превышающий типичные заряды пылевых частиц в газовых разрядах низкого давления.

**В шестой главе** продолжен цикл исследований воздействия лазерного излучения на пылевые частицы. Исследовался динамический отклик после воздействия на одиночную частицу. Показано, что при этом возникали незатуха-

ющие автоколебания пылевой частицы, подвергшейся воздействию, либо в упорядоченной плазменно-пылевой структуре формировалась вакансия.

**В заключении** формулируются наиболее важные результаты и выводы, полученные автором в ходе проведенных исследований.

Работа включает в себя научное направление, связанное с внешними воздействиями на плазменно-пылевые структуры и позволившее существенно продвинуться в понимании физических явлений в таких системах. В частности, в работе получены пионерские результаты о процессах переноса в плазменно-пылевых жидкостях и кристаллах, уникальные данные о применимости суперпозиционного приближения для задач теории жидкостей, продемонстрирована возможность сверхвысокой зарядки пылевых частиц. Актуальность выполненных исследований высока как с точки зрения фундаментальных задач, связанных с плазменно-пылевыми образованиями в космосе (газопылевые облака, лунная пыль, образования вблизи поверхностей космических тел, серебристые облака и др.), так и с точки зрения прикладных задач по созданию новых композиционных материалов (катализаторы, медицинские препараты), модификации поверхности материалов и т.п.

Новизна, достоверность и обоснованность результатов сомнений не вызывают, а ряд разработанных экспериментальных методов и подходов являются уникальными. Подтверждением этого служит широкое обсуждение полученных результатов на российских и международных конференциях, их публикация в престижных рецензируемых научных журналах, а также профессиональное использование современного научного оборудования; сопоставление данных, полученных различными методами.

К несомненным достоинствам диссертационной работы следует отнести создание современных уникальных экспериментальных стендов мирового уровня, на которых получены прогрессивные результаты, развитие уникальных методик для получения термодинамических и электрических характеристик плазменно-пылевых объектов, развитие подходов исследования упорядоченности сложных систем частиц.

Существенных недостатков в работе нет, но имеется ряд замечаний:

1. Некоторые фразы в тексте диссертации и заключения могут быть сформулированы более четко, то же относится к подписям под рисунками.

2. Недостаточное сопоставление с литературными данными, которое было бы выгодным в плане позиционирования представленного исследования среди других.
3. Глава 6 не совсем в контексте диссертационной работы, а выводы по интерпретации полученных в ней данных носят скорее качественный характер.

Также имеется ряд вопросов:

- 1 В работе применено понятие вязкости для плазменно-пылевого кристалла. Возможно, в системах «мягкой материи» упорядоченные состояния обладают свойствами, присущими жидкости. Возможно, для упорядоченных состояний логичнее использовать модуль сдвига?
- 2 Проводилось ли сопоставление численных значений коэффициента вязкости, полученных в диссертационной работе со значениями, полученными в работе [Morfill G. E., Thomas H., Konopka U., Zuzic M. //Physics of Plasmas.1999.V.6.P.1769–1780]?
- 3 Максимальный (экстремальный) заряд пылевой частицы был получен с помощью электронного пучка. Как соотносятся возникающие механические напряжения на частице с напряжениями (силами), вызываемыми электрическим зарядом на поверхности?
- 4 В работе определялась трехчастичная корреляционная функция. Это не часто встречаемый подход при исследованиях. В пылевой плазме, где можно точно определять координаты частиц, он применим, как и обосновал автор. Из приведенных графических данных по сечениям функции для разных расстояний ясно прослеживается ориентационная зависимость, это интересно по сравнению с применением парных функций. Однако, не приводится практический никакой физический анализ пылевого образования с применением тройных корреляционных функций. Проводился ли такой анализ?

Отмеченные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку работы и не снижают ценность полученных результатов.

Результаты, полученные в диссертации, представляют практический интерес для организаций, связанных с излучением физики плазмы и разработкой устройств на основе плазменных технологий. Результаты могут быть использованы в Институте общей физики им А. М. Прохорова РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, Институте прикладной физики РАН, Физическом институте РАН, Сколковском институте науки и техники, Институте теплофизики им. Кутате-

ладзе СО РАН, Троицком институте инновационных и термоядерных исследований, МФТИ, ОИВТ РАН, ИКИ РАН и др.

Материал диссертации изложен логично и последовательно, наглядно проиллюстрирован. Полученные результаты опубликованы 26 отечественных и зарубежных научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Автор работы является признанным специалистом в физике пылевой плазмы, результаты работы неоднократно докладывались на ведущих международных и российских научных конференциях.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, 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».

Отзыв составил  
профессор физического факультета СПбГУ,  
д.ф.-м.н., профессор

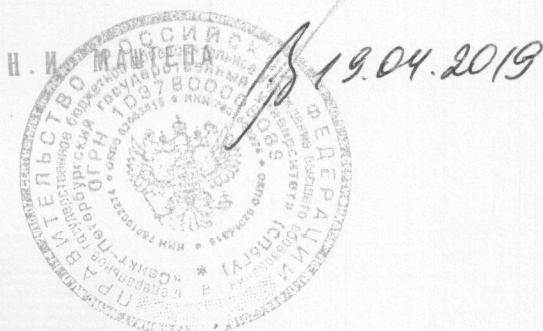
В.Ю. Карасев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Санкт-Петербургский Государственный Университет  
(СПбГУ),

199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7/9

Подпись В.Ю. Карасева заверяю.

личную подпись заверяю  
начальник отдела кадров МЗ



Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей