

ОТЗЫВ

официального оппонента Сухинина Геннадия Ивановича на диссертационную работу Николаева Владислава Сергеевича «Динамические свойства и фазовые переходы в неоднородных плазменно-пылевых системах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Исследования систем, состоящих из конечного числа заряженных частиц, представляют существенный интерес как для академических, так и для прикладных научных направлений. К таким системам можно отнести структуры из конденсированных дисперсных частиц в плазме или коллоидную плазму. Для удержания заряженных частиц в таких системах обычно используются различные электростатические ловушки, которые могут создаваться искусственно или возникать естественным образом. Анализ влияния удерживающих ловушек на структурные и динамические свойства систем заряженных частиц является важной актуальной задачей, решение которой необходимо для совершенствования процессов термоядерного и плазмохимического синтеза, понимания процессов, происходящих с участием пылевой плазмы в атмосфере Земли и в межпланетных средах. Изучение свойств таких систем в лабораторных установках обуславливает возможность проведения аналогий с классическим конденсированным веществом. Широкое использование таких систем в качестве модельных при исследовании волновых, транспортных, неравновесных процессов требует глубокого понимания поведения систем на локальном уровне.

Диссертационная работа Николаева Владислава Сергеевича посвящена исследованию образования плазменно-пылевых структур и влияния удерживающего конфайнмента на пространственное распределение динамических свойств и характер фазовых переходов в плазменно-пылевых структурах. Развивается теория неоднородности динамических свойств, таких как амплитуды и характерные частоты тепловых колебаний частиц, параметры Линдемана и неидеальности в плазменно-пылевых структурах заряженных частиц, находящихся в параболическом конфайнменте. Для решения поставленных задач применяются аналитические подходы, основанные на теории динамики кристаллической решетки в квазигармоническом приближении и компьютерное моделирование, использующее программный пакет LAMMPS и самостоятельно разработанный код на суперкомпьютерах МФТИ и ОИВТ РАН.

Диссертация Николаева В. С. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Объем диссертации 115 страниц, включая 30 рисунков. Библиография включает 125 наименований. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая значимость решаемых в работе задач, сформулированы цели, задачи, используемые методы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор. Приводятся основные положения физики плазмы с конденсированной фазой, обсуждаются результаты исследований структурных и динамических свойств систем, состоящих из малого числа заряженных частиц – т.н. юкавовских шаров. Выделены результаты работ по влиянию удерживающих ловушек на структурные характеристики и характер фазовых превращений в системах заряженных частиц. Отдельный раздел посвящен анализу уже известных критериев плавления, применяемых для систем из пылевых частиц в газоразрядной плазме. Приводятся литературные источники, в которых сформулированы основные положения используемых теоретических и расчетных методов.

Во второй главе формулируется аналитическая теория пространственной неоднородности динамических свойств в системах заряженных частиц в удерживающей электростатической ловушке. Получена функциональная связь между локальным значением плотности и амплитудой тепловых колебаний частиц в пространственно неоднородной системе сильно экранированных зарядов в параболическом конфайнменте. Выведены формулы и проведены расчёты для радиальных профилей амплитуды тепловых колебаний частиц, параметров Линдемана и неидеальности Γ^* . Автор определяет границы применимости используемых приближений и приходит к выводу, что под влиянием ловушки система из заряженных частиц в условиях сильной экранировки демонстрирует пространственную неоднородность по параметру Линдемана. Эта теория дополняет работы по неоднородности структурных свойств (плотности и межчастичного расстояния) за авторством Totsuji H., Henning C., Ludwig P., Filinov A., Klumov V. A. и др. Приведены результаты сравнения расчетов с использованием полученных аналитических формул с экспериментальными данными, опубликованными индийской группой в 2018 году. Сравнение выглядит удовлетворительным.

Третья глава посвящена описанию метода численных расчетов свойств систем заряженных частиц, аналогичного методу классической молекулярной динамики. Автор использует широкий спектр вариантов описания взаимодействия пылевых частиц: классический потенциал Юкавы, потенциал Юкавы с включением точечного ионного фокуса, сеточный потенциал, рассчитанный Д.А. Колотинским из моделирования кинетики ионов плазмы. При рассмотрении плазменно-пылевых систем в уравнениях движения пылевых частиц учитываются ланжевеновские слагаемые, моделирующие взаимодействие частиц с окружающим разрядным газом. Методика обработки результатов расчетов, описанная в главе, позволяет исследовать структуры из заряженных частиц в локальном приближении.

В четвертой главе приведены результаты расчета радиальных профилей плотности, амплитуды тепловых колебаний, параметров Линдемана и неидеальности в квазиодномерных, квазидвумерных и трехмерных структурах из заряженных частиц. Помимо рассмотрения различных структурных конфигураций, проведены расчеты для структур с различным числом частиц – от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч. Полученные радиальные профили характеристик с хорошей точностью

описываются формулами, выведенными во второй главе диссертации, что позволяет отметить согласованность представляемых результатов. Подтверждается вывод о принципиально неоднородном распределении индикаторов фазового состояния в системе заряженных частиц под влиянием конфайнмента. На основании этого делается заключение, что системы из конечного числа заряженных частиц в общем случае необходимо рассматривать в локальном приближении как системы принципиально неоднородные. Безусловно, этот вывод получен для модельных систем, для которых не учитывается возможное отличие в зарядах частиц, находящихся в различных областях структуры, и возможное отклонение потенциала взаимодействия от экранированного кулоновского. Тем не менее, это не уменьшает ценность полученных результатов, поскольку рассматриваемая модель может использоваться в качестве хорошего первого приближения для анализа экспериментальных данных и построения более точных моделей.

Пятая глава «Неоднородность фазового состояния плазменно-пылевого монослоя с учетом невзаимных эффектов» посвящена рассмотрению процесса плавления систем заряженных частиц в параболическом конфайнменте, в том числе с учетом эффекта ионного фокуса, приводящего к эффективной невзаимности сил, действующих между пылевыми частицами в условиях плазменно-пылевых экспериментов. Самым ценным результатом главы является вывод о применимости параметра флуктуации межчастичного расстояния к локальному окружению частицы при анализе процесса плавления. Впервые получен неоднородный радиальный профиль этого параметра, который полезно использовать при обработке данных экспериментов.

Интересны результаты главы по сценариям сосуществования фаз в «классическом» монослое и в монослое с учетом невзаимных эффектов. В «классическом» монослое наблюдается сосуществование упорядоченного ядра с расплавленными оболочками. В монослое с невзаимными эффектами реализуется обратный эффект: плотное расплавленное ядро сосуществует с упорядоченными разреженными оболочками в широком диапазоне значений коэффициента трения γ . Для объяснения этого эффекта проведено специальное исследование, показывающее, что под действием невзаимных эффектов в центральной области возникает неустойчивость связанных мод. Вследствие структурной неоднородности системы она остается локализованной в центральной области. За счет этого энергия движения частиц в центральной области существенно возрастает, и при дальнейшем уменьшении γ центральная область плавится. Менее плотные оболочки системы могут при этом оставаться упорядоченными, если теплообмен с центральной областью недостаточно интенсивен для их плавления.

В заключении обобщены и разъяснены выносимые на защиту положения.

К диссертации Николаева В.С. имеется ряд вопросов и замечаний:

1. В названии диссертационной работы и в ее тексте не совсем корректно используется термин «фазовые переходы». В общем случае этот термин

применяется к системам в термодинамическом пределе. Автором же рассматриваются пылевые плазменные системы, состоящие из достаточно малого числа частиц, которые, конечно, являются открытыми нелинейными диссипативными системами, в которых возможно формирование упорядоченных структур и могут происходить переходы от одной структуры к другой. Поэтому имеет смысл говорить о переходах между различными стационарными структурами системы, а не о «фазовых переходах».

2. Рассматриваемые в диссертации задачи являются многопараметрическими. Большое влияние на свойства пылевых структур оказывает окружающая плазма, в том числе распределения температуры и плотности заряженных компонент плазмы, величины потока ионов и локального электрического поля. Допускает ли предложенный автором подход учет пространственного распределения параметров плазмы в области существования пылевой структуры? Как такой учет повлияет на характер полученных результатов?
3. Работа посвящена учету влияния конфайнмента на пространственную неоднородность пылевых структур. В то же время заряд частиц, от которого существенно зависят все исследуемые характеристики плазменно-пылевых систем, считается постоянным. Насколько это допущение обосновано?
4. При развитии аналитической теории во второй главе автором обозначены границы применимости полученных выражений. Указано, что полученные формулы применимы для сильно экранированных систем. Возникает вопрос, как изменятся полученные результаты в случае, если потенциал будет слабо экранирован?
5. В ряде экспериментов, в том числе в работах, выполненных на Международной Космической Станции, наблюдаемые пылевые структуры могут быть однородны или же имеют разреженную центральную область (и даже войды) и плотные оболочки. Как автор объясняет эти эффекты в рамках предложенной в диссертации теоретической модели?

Приведённые замечания не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой диссертации. Выполнен большой объем работ, результаты опубликованы в десяти работах в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах. Апробация проведена более чем на 30 конференциях, на многих из которых автор выступал с устными докладами. Высокое качество работы Николаева В.С. подтверждается рядом наград, полученных им по итогам конференций. Диссертация Николаева В.С. 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, Объединённом 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.

Результаты диссертационной работы хорошо известны специалистам, докладывались более чем на 30 российских и международных конференциях, опубликованы в 10 работах в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах. 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 Николаев Владислав Сергеевич 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

