

На правах рукописи

Йе Тун

**ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ
В ДВУМЕРНЫХ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУРАХ**

01.04.08 – физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, ПЕТРОВ Олег Федорович.

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., проф. кафедры общей физики, Санкт-Петербургский государственный университет, КАРАСЕВ Виктор Юрьевич;

д.ф.-м.н., в.н.с., Федеральное государственное унитарное предприятие "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), г. Троицк, ФИЛИППОВ Анатолий Васильевич.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

Защита состоится «__» декабря 2015 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412 Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, ОИВТ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.110.02
к.ф.-м.н.



М.М. Васильев

© ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2015

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному изучению двумерного фазового перехода в сильнонеидеальной пылевой плазме.

Актуальность работы. Плавление двумерных (2D) систем представляет собой интерес, как с теоретической, так и с практической точек зрения, в первую очередь из-за его качественного отличия от фазового перехода «твердое тело-жидкость» в трехмерных (3D) системах [1-2]. В настоящее время существуют две основные теоретические модели, используемые для описания плавления двумерных систем. Согласно одной из них, т.н. теории Березинского-Костерлица-Таулесса (в англоязычной литературе Berezinskii-Kosterlitz-Thouless или Kosterlitz-Thouless-Halperin-Nelson-Young (КТННУ-) theory), основанной на рассмотрении поведения топологических дефектов (дисклинаций и дислокаций), переход 2D - системы из кристаллического в жидкое состояние носит двухстадийный характер с образованием промежуточной, т.н. гексатической фазы [3–8]. В кристалле ориентационная и трансляционная симметрия имеют дальний порядок. При переходе в гексатическую фазу трансляционный дальний порядок нарушается, но при этом сохраняется ориентационная жесткость. В жидкостной фазе как трансляционный, так и ориентационный порядок носят короткодействующий характер.

Конкурирующая теория, описывающая фазовые переходы в двумерных системах с точки зрения формирования топологических дефектов, основана на формировании границ раздела в системе (grain-boundary induced melting) [9]. В отличие от КТННУ-теории, в этом подходе фазовый переход является переходом первого рода и происходит без формирования промежуточной фазы.

Доказательства в пользу теории Березинского-Костерлица-Таулесса в системах с различными потенциалами межчастичного взаимодействия были представлены в серии экспериментальных и численных работ [10–15], в том числе для электронов на поверхности жидкого гелия [10], в коллоидных растворах с полимерными частицами [11,12], для магнитных пузырьков в тонких пленках [13-15]. Отдельные попытки обнаружить гексатическую фазу были также сделаны и в экспериментах с пылевой плазмой [16-21], однако из противоречивости представленных на настоящий момент в литературе экспериментальных и численных результатов можно заключить, что сценарий фазового перехода, имеющий место в двумерных плазменно-пылевых структурах, до сих пор не выяснен.

Пылевая плазма, представляющая собой систему нейтральных атомов, электронов, ионов и заряженных частиц микронных размеров, является

удобным объектом для изучения фазовых переходов в неидеальных системах, так как, благодаря своим относительно большим размерам (1-10 мкм), пылевые частицы могут наблюдаться при помощи видеокамеры, что существенно упрощает использование прямых диагностических методов для анализа плазменно-пылевых структур [22,23]. Пылевая плазма повсеместно распространена в природе, а также она часто возникает в ряде технологических процессов, например, при производстве полупроводников.

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное изучение трансляционного и ориентационного порядка и топологических дефектов, полученных при плавлении пылевого монослоя в слабоионизированной плазме вч разряда низкого давления

Для достижения поставленной цели были выполнены экспериментальные наблюдения плавления плазменно-пылевого монослоя (двумерный фазовый переход) в газовом разряде низкого давления. Проведены измерения и выполнен анализ парных и ориентационных корреляционных функций, а также числа топологических дефектов в монослое. Характер изменения ориентационных корреляционных функций подтверждает существование фазового перехода твердое тело - гексатическая фаза - жидкость, что полностью согласуется с теорией Березинского-Костерлица-Таулесса [3-6].

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Создан экспериментальный стенд для изучения фазовых переходов в двумерной плазменно-пылевой системе.
2. Получены новые результаты экспериментального изучения фазового перехода в двумерной плазменно-пылевой системе, включая трансляционный и ориентационный порядок и топологические дефекты.
3. Впервые экспериментально обнаружена промежуточная (гексатическая) фаза при фазовом переходе в двумерной плазменно-пылевой системе.
4. Получены новые результаты восстановления потенциала взаимодействия при экспериментальном изучении фазового перехода в двумерной плазменно-пылевой системе.

Практическая ценность работы. Результаты экспериментальных исследований, представленных в диссертации, могут быть полезны широкому кругу специалистов, занимающихся изучением физических свойств физических свойств сильнонеидеальных кулоновских систем, в том числе сильнонеидеальной пылевой плазмы, и разработкой их приложений. В частности, плавление двумерных (2D) систем представляет собой интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения, в первую очередь из-за его качественного отличия от фазового перехода «твердое тело-жидкость» в

трехмерных (3D) системах. Результаты исследований могут быть полезны для создания материалов из тонких пленок с заданными свойствами.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальный стенд для изучения фазового перехода в двумерной плазменно-пылевой системе.

2. Результаты экспериментального изучения фазового перехода в двумерной плазменно-пылевой системе, включая трансляционный и ориентационный порядок и топологические дефекты.

3. Экспериментальное обнаружение промежуточной (гексатической) фазы при фазовом переходе в двумерной плазменно-пылевой системе.

4. Результаты восстановления потенциала взаимодействия при экспериментальном изучении фазового перехода в двумерной плазменно-пылевой системе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: LVI, LVII Научных конференциях МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” 2013-2014гг.; XXIX Международной конференции “Уравнения состояния вещества”, 2014г.; 41th European Physical Society Conference on Plasma Physics 2014; International congress on plasma physics ICPP 2014, International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems SCCS 2014, 12th Workshop Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation 2014 и др.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, включая 2 статьи в рецензируемых журналах (список публикаций приведен в конце автореферата).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 116 страниц машинописного текста, 21 рисунок и список цитируемой литературы из 201 наименований.

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим. Автор принимал активное участие в постановке научных задач. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены из проведенных автором экспериментов. На основании проведенных исследований и теоретического анализа полученных результатов были сформулированы и обоснованы выводы и положения, вошедшие в диссертацию.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость задач, решаемых в работе. Сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней вводятся необходимые для дальнейшего изложения понятия и выражения. Рассмотрены основные экспериментальные и численные методы и подходы в изучении свойств и параметров плазменной и пылевой компоненты газоразрядной плазмы. Также приведены условия наблюдения пылевых структур в лабораторной плазме газовых разрядов, включая обзор существующих работ по фазовым переходам в двумерных системах взаимодействующих частиц. Глава 1 состоит из четырех частей, включая выводы.

В **п.1.1** рассматриваются экспериментальные наблюдения пылевых структур в лабораторной плазме газовых разрядов, включая эксперименты по плавлению таких структур.

В **п.1.1.1** описаны условия экспериментов в лабораторной пылевой плазме. Большинство экспериментов по изучению свойств пылевой плазмы проводится в газовых разрядах при давлениях газа P (обычно инертного) от 0.03 до 3 Торр. Плазма газовых разрядов представляет собой частично ионизированный газ, температура ионов ($T_i \sim 0.03$ эВ) в котором много ниже температуры электронов ($T_e \sim 1-7$ эВ). Широкое использование газоразрядных камер для изучения свойств пылевой плазмы обусловлено наличием в них электрических полей, способных удерживать отрицательно заряженные макрочастицы как в поле тяжести земли, так и в радиальном (перпендикулярном силе тяжести) направлении.

В большинстве экспериментов используются частицы радиусом $a_p \sim 1-5$ мкм, массой $M \sim 10^{-10}$ г, которые в газоразрядных камерах формируют как квазистационарные, так и динамические пылевые структуры. Концентрация пылевых частиц n в таких структурах варьируется от 10^3 см^{-3} до 10^5 см^{-3} , а кинетическая температура T , характеризующая хаотическое движение частиц, может достигать $\sim 1-100$ эВ. Зарядка пылевых частиц осуществляется путем поглощения потоков окружающей плазмы. При этом они приобретают отрицательный заряд $eZ \sim 10^3-10^5 e$.

В **п. 1.1.2** представлен аналитический обзор литературы по фазовым переходам в пылевых структурах в лабораторной плазме. Дается краткая справка о существующих теориях плавления в двумерных системах.

В **п.1.2** представлены основные методы диагностики параметров плазмы и пылевой компоненты.

В п. 1.2.1 дается понятие о методах диагностики параметров фоновой плазмы. Изложены физические основы зондового метода, развитого в 1923 г. Ленгмюром [24]. Зондовый метод (практически единственный из всех диагностических приемов) позволяет непосредственно находить локальные характеристики плазмы, т.е. пространственное распределение параметров, и в этом его особая ценность. Однако это преимущество непосредственно связано с основным дефектом метода – а именно, узкий диапазон экспериментальных условий, в котором практически отсутствует опасность некорректных измерений и ошибочной интерпретации полученных результатов.

П. 1.2.2 посвящен обзору методов диагностики пылевой компоненты плазмы. Рассмотрены оптические методы, основным преимуществом которых является высокая точность, отсутствие воздействия на измеряемый объект, быстрое действие, возможность применения автоматической обработки и получения данных в реальном времени. Оптические методы, активно применяющиеся в настоящее время для диагностики пылевой компоненты плазмы, можно условно разделить на три класса: методы, основанные на непосредственной визуализации пылевых частиц; методы, основанные на измерениях ослабления и рассеяния света от внешнего источника излучения и спектроскопические методы, которые включают в себя измерения собственного излучения конденсированной фазы.

В п.1.3 приведено описание численного моделирования динамики макрочастиц в пылевой плазме методом молекулярной динамики, основанным на решении уравнений Ланжевена, результаты которого были использованы для сравнения с экспериментальными данными, полученными в данной работе (см. главу 3). Для описания взаимодействия пылевых частиц в плазме использовался потенциал Юкава

$$\phi(r) = \frac{Ze}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda}\right).$$

Параметры численной задачи

варьировались в широком диапазоне эффективного параметра неидеальности:

$$\Gamma^* = a_1 r_p^2 M U''(l_p) / (2T), \text{ и параметра масштабирования: } \xi = |a_2 U''(r_p)|^{1/2} (2\pi M)^{-1/2} v_{fr}^{-1},$$

где $a_1 = a_2 \equiv 1$ для 3-х мерных систем; и $a_1 = 1.5, a_2 = 2$ для 2-х мерного случая.

Расчеты проводились для однородной квазидвумерной системы, моделирующей протяженный пылевой слой. Величина параметра масштабирования варьировалась в пределах от $\xi \approx 0.04$ до $\xi \approx 3.6$, типичных для условий экспериментов в плазме газовых разрядов. Величина эффективного параметра Γ^* менялась от ~ 3 до ~ 300 .

П. 1.4. содержит заключение и выводы к Главе 1.

Во **второй главе** представлено описание основных элементов

экспериментальной установки и используемых средств диагностики (рис.1), а также приведено описание эксперимента по изучению процесса разогрева и плавления протяженных монослойных плазменно-пылевых структур, формируемых в приэлектродном слое высокочастотного емкостного (ВЧ-) разряда. Рассмотрены основные методы обработки экспериментальных данных для получения различных характеристик исследуемой системы, таких как координаты, траектории движения, скорости пылевых частиц, их средняя кинетическая температура, параметры неидеальности, функции массопереноса, корреляционные функции и др.

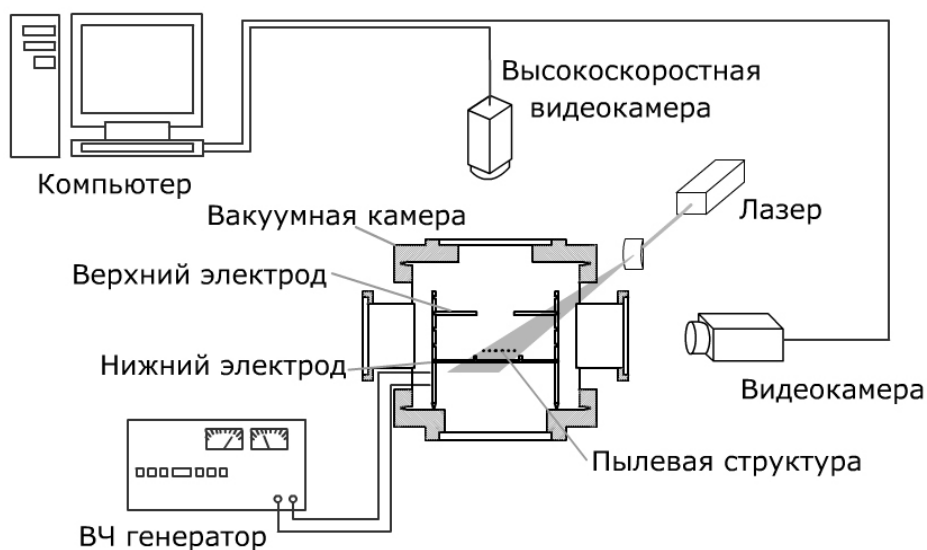


Рис. 1. Схематическое изображение диагностического комплекса экспериментальной установки

В п.2.1. приведено подробное описание экспериментальной установки, состоящей из газоразрядной вакуумной камеры, вакуумного поста, оптической и электрической системы, а также диагностического комплекса для визуализации и регистрации положения пылевых частиц в слое. Визуализация пылевых частиц осуществлялась путем их подсветки лазерным излучением через оптическую схему. Наблюдение за частицами проводилось при помощи двух видеокамер, расположенных в горизонтальной и вертикальной плоскостях, с частотой съемки в диапазоне от 50 до 500 кадров в секунду. Полученные видеоизображения использовались для анализа динамических и структурных свойств монослойных плазменно-пылевых структур.

В п.2.2. описаны условия эксперимента по изучению процесса разогрева и плавления монослойных плазменно-пылевых структур проводились в атмосфере аргона при рабочих давлениях $P = 4-7$ Па и при мощностях разряда $W \approx 4-12$ Вт. Электроды, помещенные в вакуумную камеру, устанавливались на расстоянии 5 см друг от друга. На электроды через согласующее устройство

подавалось напряжение от высокочастотного генератора с частотой 13,56 МГц, в результате между ними в атмосфере буферного газа возникал тлеющий разряд. Для создания потенциальной ловушки для удержания пылевых частиц

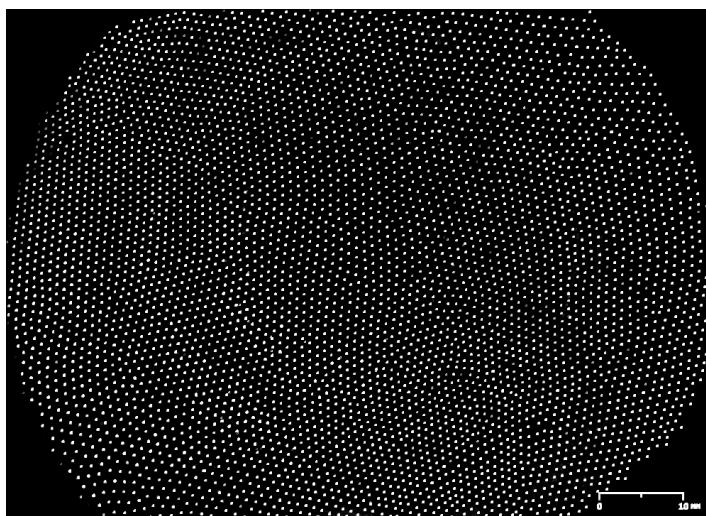


Рис. 2. Иллюстрация видеоизображения протяженной ($\sim 10^4$ частиц) монослойной плазменно-пылевой структуры, образованной монодисперсными полистироловыми частицами в приэлектродном слое ВЧ-разряда в аргоне при давлении 5 Па, и мощности разряда 19 Вт

на нижний электрод устанавливалось кольцо диаметра 10 см и высотой 0,2 см, внутри которого и происходило формирование пылевой структуры. В разрядный промежуток из диспенсера, расположенного в верхней части разрядной камеры, инжектировались сферические пылевые частицы, которые, попадая в разряд и приобретая значительный отрицательный заряд, при достижении баланса электрической силы и силы тяжести, формировали в приэлектродном слое ВЧ-разряда монослойные плазменно-пылевые структуры с числом частиц не менее 2500-3000 частиц (вплоть до 10^4 частиц, рис. 2).

Плавление плазменно-пылевых структур достигалось путем воздействия лазерного «ножа» с однородным профилем интенсивности излучения на структуру в плоскости монослоя. По мере увеличения интенсивности лазерного излучения (в диапазоне от 20 до 300 мВт) происходил кинетический разогрев пылевых частиц, и структура переходила из кристаллического состояния в жидкостное. При этом монослойность плазменно-пылевой структуры не нарушалась, что было видно при наблюдениях за структурой через боковую видеокамеру.

В п. 2.3. приведены основные методы, используемые для обработки экспериментальных данных. Определение координат частиц было основано на применении метода Фурье-фильтрации полученных в ходе эксперимента видеоизображений. Информация о положении частиц на кадре дала возможность определить все основные пространственные характеристики системы (среднее межчастичное расстояние, плотность частиц, парные и ориентационные корреляционные функции, диаграммы Вороного, число и расположение дефектов). Траектории пылевых частиц определялись исходя из принципа взаимно-близкого расположения частиц на двух последовательных

кадрах. Полученные траектории движения пылевых частиц использовались для расчета их скоростей, кинетической температуры, среднеквадратичных смещений и функций массопереноса. Восстановление эффективного параметра неидеальности было основано на анализе процессов массопереноса на малых временах наблюдения [25,26]. Парный потенциал межчастичного взаимодействия определялся с помощью метода, описанного в работе [27] на основе решения обратной задачи Ланжевена. Фазовое состояние монослойной плазменно-пылевой системы определялось из анализа формы нормированных ориентационных корреляционных функций [28].

В п. 2.4 сформулированы выводы ко второй главе.

В третьей главе представлены первые результаты экспериментального наблюдения двухстадийного процесса плавления монослойной структуры пылевых частиц в плазме вч газового разряда низкого давления. Проведены измерения и выполнен анализ парных и ориентационных корреляционных функций, а также числа топологических дефектов, парных потенциалов межчастичного взаимодействия и «избыточной» энтропии.

В п.3.1 представлены новые экспериментальные данные по исследованию двумерного фазового перехода в пылевой подсистеме плазмы емкостного высокочастотного газового разряда. Основные результаты были получены для плазменно-пылевых структур, образованных сферическими монодисперсными полистироловыми частицами плотностью $1,05 \text{ г/см}^3$ и диаметром $10,16 \text{ мкм}$ в аргоновой плазме при давлении $4,3 \text{ Па}$ и мощности разряда $17,9 \text{ Вт}$. При этом мощность лазера для кинетического разогрева пылевой компоненты варьировалась от 20 до 220 мВт .

Полученные распределения скоростей пылевых частиц в пределах экспериментальной погрешности соответствуют распределению Максвелла. При этом отклонения измеряемых скоростей частиц по двум регистрируемым степеням свободы (x, y) были незначительны и находились в пределах $\sim 0.5\text{--}3\%$. Также были получены функции массопереноса $D(t) = \langle \Delta r^2 \rangle / (4t)$ (здесь $\langle \Delta r^2 \rangle$ – среднеквадратичное смещение пылевых частиц), парные и ориентационные корреляционные функции.

Величина эффективного параметра неидеальности пылевой подсистемы в двумерном приближении $\Gamma^* = 1.5 \Gamma (1 + \kappa + \kappa^2/2) \exp(-\kappa)$, где Γ – кулоновский параметр неидеальности, а κ – параметр экранирования, была определена двумя независимыми способами, а именно: путем наилучшего согласования между измеренными функциями $D(t)$ и соответствующим аналитическим решением для гармонического осциллятора [26], а также по результатам численного моделирования, используя пик парной корреляционной функции [29]. Полученные значения параметра Γ^* представлены на рис. 3 для различных

экспериментов. При вышеописанных параметрах эксперимента величина Γ^* изменялась в пределах от 10 до 600, а погрешность ее определения была оценена в $\sim 20\%$.

В п.3.2 на основе детального анализа парных и ориентационных корреляционных функций, числа топологических дефектов, а также величины «избыточной» энтропии делается вывод о переходе двумерного пылевого монослоя в плазме из кристаллического состояния в жидкость через промежуточную гексатическую фазу.

На рис. 4 приведены парные корреляционные функции $g(r)$ и ориентационные корреляционные функции $g_6(r)$, полученные в эксперименте при трех различных значениях параметра неидеальности Γ^* вблизи фазовых переходов. Также на рис. 2 представлены результаты численных расчетов функций $g_6(r)$ при различных параметрах неидеальности $\Gamma^* = 220, 140$ и 55 , соответствующих, согласно теории [16], кристаллической ($\Gamma^*=220$), гексатической ($\Gamma^*=140$) и жидкостной фазе ($\Gamma^*=55$).

На рис. 5 показана зависимость числа дефектов $\delta = 100 - N_6$ (%) от $1/\Gamma^*$, где вертикальные пунктирные линии указывают на фазовые переходы при значениях $\Gamma^* \approx 100$ и $\Gamma^* \approx 150$, полученных в работе [16]. На рис. 6 в двойном логарифмическом масштабе представлены нормированные функции $g_6^* = 100g_6(r/r_p)/N_6$ для жидкостной и гексатической фазы при различных значениях параметра $\Gamma^*=10, 85, 110, 140$.

При кинетическом разогреве монослоя (до значений $\Gamma^*=100-140$) наблюдался экспоненциальный характер убывания пиков парной функции $\propto \exp(-0.5r/r_p)$, при этом ориентационный порядок убывает, как степенная функция, $\propto (r/r_p)^{-\eta}$ при $\eta = 1/5$. (рис.4). Прямые линии на графике рис.6 в двойном логарифмическом масштабе, соответствующие степенной зависимости $r^{-1/4}$, являются пределом для квазидальнего порядка в теории Березинского-

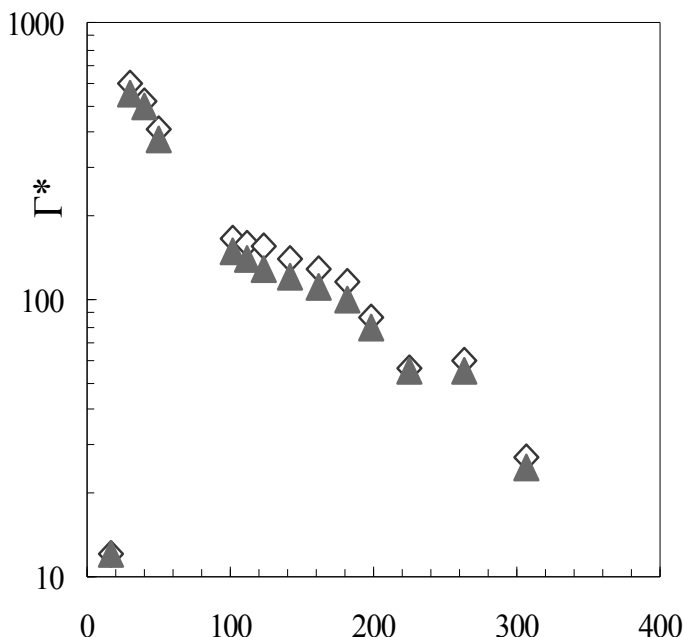


Рис.3. Эффективный параметр неидеальности Γ^* , восстановленный по результатам численного моделирования, используя пик парной корреляционной функции (ромбы) и путем анализа функции массопереноса (треугольники), в зависимости от мощности лазерного излучения

Костерлица-Таулесса. При переходе системы в изотропную жидкостную фазу (в точке $\Gamma^* \approx 100$) наблюдается экспоненциальное убывание как парной функции $g(r)$, так и функции $g_6(r)$. Это означает, что сценарий плавления, предложенный теорией Березинского-Костерлица-Таулесса, хорошо согласуется с представленными измерениями.

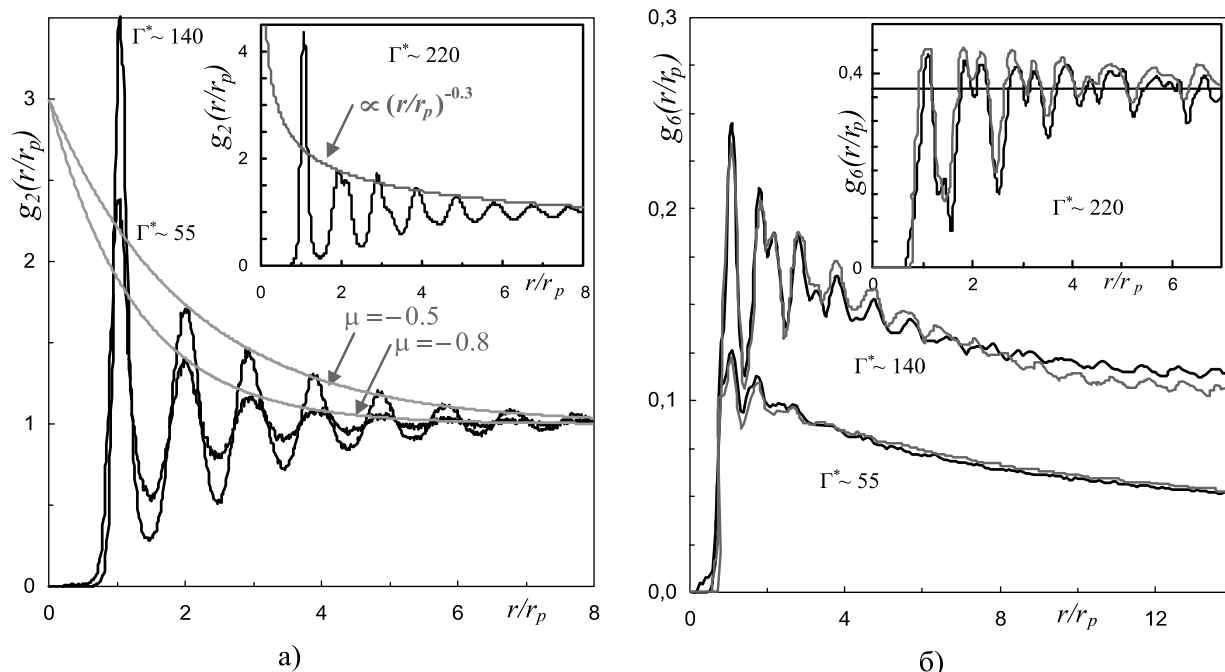


Рис. 4. Парные и ориентационные корреляционные функции (черные линии) при различных параметрах неидеальности Γ^* для кристаллической ($\Gamma^* = 220$), гексатической ($\Gamma^* = 140$) и жидкостной фазы ($\Gamma^* = 55$), соответственно. Серые кривые: а - аппроксимации пиков парных корреляционных функций $g_2(r/r_p)$, б - результаты численного моделирования функций $g_6(r/r_p)$ с параметрами, близкими к эксперименту

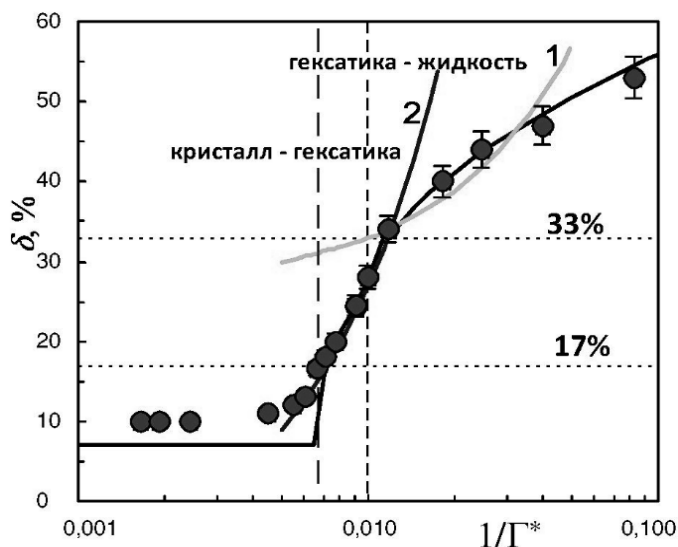


Рис. 5. Зависимость числа дефектов $\delta = 100 - N_6$ (%) от $1/\Gamma^*$ (символы). Ломаная линия соответствует результатам численного моделирования. Сплошные кривые - линейные аппроксимации температурной зависимости числа дефектов в различных фазовых состояниях: 1 - $f(\Gamma^*) \cong 27 + 600/\Gamma^*$; 2 - $f(\Gamma^*) \cong -9 + 3600/\Gamma^*$. Вертикальные пунктирные линии - фазовые переходы $\Gamma^* \approx 100$ и $\Gamma^* \approx 150$, найденные в [16]

Как видно из рис.6, при $\Gamma^* = 110-140$ и $\Gamma^* = 10-85$ форма ориентационных корреляционных функций сохраняется, тогда как при изменении Γ^* от 85 до 110

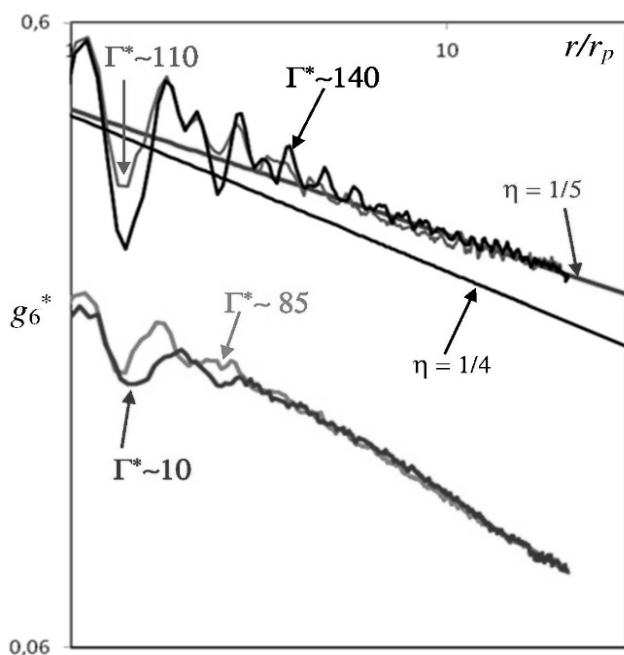


Рис.6. Значения ориентационных корреляционных функций $g_6^* = 100g_6(r/r_p)/N_6$, нормированные на число частиц N_6 (в % отношении) с 6-тью ближайшими соседями для различных значений параметра неидеальности $\Gamma^* = 10, 85$ и 140 . Прямыми линиями показаны аппроксимации экспериментальных данных функцией $\sim (r/r_p)^{-\eta}$

происходит резкое изменение формы (другая затухающая асимптотика в сравнении с пределом при $\eta = 1/4$) и абсолютных значений нормированных корреляционных функций, что, согласно работе [28], указывает на переход из одной фазы (гексатической при $\Gamma^* = 110-140$) в другую (изотропную жидкость при $\Gamma^* = 10-85$).

П.3.3 посвящен экспериментальному определению сил парного взаимодействия между пылевыми частицами для различных фазовых состояний пылевой подсистемы. Для восстановления пространственного распределения сил межчастичного взаимодействия использовался метод, основанный на решении обратной задачи о движении пылевых частиц [27]. Показано, что в диапазоне от 1 до 2 средних межчастичных расстояний r_p форма потенциала взаимодействия при плавлении двумерной

плазменно-пылевой системы предложенным в данной работе способом не меняется.

В п.3.3 сформулированы выводы по Главе 3.

В **Заключении** представлены основные результаты работы:

1. Создан экспериментальный стенд для изучения фазового перехода в двумерной плазменно-пылевой системе. Экспериментальный стенд представляет собой газоразрядную камеру, которая наполнялась аргоном до давлений 4 - 7 Па. Мощность ВЧ-разряда в экспериментах составляла 4 - 12 Вт. Для формирования плазменно-пылевых структур в разряд инжестировались полистироловые пылевые частицы диаметром 10.16 мкм и плотностью 1.05 г/см³. Они формировали пылевую структуру (монослой) в приэлектродной области вч разряда с числом частиц не менее 2500-3000. Для визуализации (подсветки) структуры и одновременно для разогрева монослоя (увеличения кинетической температуры частиц) применялся аргоновый лазер, мощность излучения которого менялась от 18 до 300 мВт.

2. Получены новые результаты экспериментального изучения фазового перехода в двумерной плазменно-пылевой системе, включая трансляционный и ориентационный порядок и топологические дефекты. Результаты анализа полученных в эксперименте корреляционных функций показывают, что в пределах точности полученных данных, для монослоя при $\Gamma^*=220$ пространственное убывание пиков (g^s) парной корреляционной функции соответствует степенной зависимости $g^s \propto (r/r_p)^{-0.3}$, тогда как ориентационная функция с увеличением расстояния r не убывает, что соответствует кристаллической структуре. При кинетическом разогреве монослоя (более высоких кинетических температурах частиц, соответствующих $\Gamma^*=140$) наблюдается экспоненциальный характер убывания пиков парной функции: $\{g^s-1\} \propto \exp(-0.5r/r_p)$, при этом ориентационный порядок убывает, как степенная функция, $\propto (r/r_p)^{-\eta}$ при $\eta = 1/5$. Такое поведение характерно для гексатической фазы. При дальнейшем увеличении температуры частиц ($\Gamma^*=85$) пространственное убывание пиков $\{g^s-1\}$ парной корреляционной функции соответствует жидкостной фазе.

3. Впервые экспериментально обнаружена промежуточная (гексатическая) фаза при фазовом переходе в двумерной плазменно-пылевой системе. Подтверждение существования гексатической фазы было получено при анализе формы нормированных ориентационных корреляционных функций. При значениях параметра неидеальности $\Gamma^*=110-140$ и $\Gamma^*=10-85$ форма ориентационных корреляционных функций сохраняется, тогда как при изменении Γ^* от 85 до 110 происходит резкое изменение формы (другая затухающая асимптотика в сравнении с пределом при $\eta = 1/4$) и абсолютных значений нормированных корреляционных функций, что указывает на переход из одной фазы (гексатической при $\Gamma^*=110-140$) в другую (изотропную жидкость при $\Gamma^*=10-85$).

4. Получены новые результаты восстановления потенциала взаимодействия при экспериментальном изучении фазового перехода в двумерной плазменно-пылевой системе. Для восстановления пространственного распределения сил парного межчастичного взаимодействия использовался метод, основанный на решении переопределенной системы уравнений движения пылевых частиц. Пространственное распределение сил взаимодействия $F_{int}(r)$ определялось в диапазоне от $\sim r_p$ до $\sim 2r_p$, где верхняя граница зависит от временного и пространственного разрешения и размеров анализируемого фрагмента системы. Профиль сил межчастичного взаимодействия одинаков (на малых расстояниях в сравнении с размерами структуры) для всех фазовых состояний пылевой подсистемы, наблюдаемой в эксперименте, и может быть

аппроксимирован экранированной кулоновской силой $F(l)=(eZ/r)^2(1+kr/r_p)\exp(-kr/r_p)$, где величина заряда равна $Z = 15000$, а параметр экранирования - $\kappa = 0.7$.

Основные результаты диссертации представлены в 11 печатных работах, включая три статьи в реферируемых журналах:

1. О.Ф. Петров, О.С. Ваулина, М.М. Васильев, Й. Тун, Е.А. Лисин, М.И. Мясников, С.Н. Антипов, В.М. Чепелев и В.Е.Форттов, *Кулоновские системы сильновзаимодействующих пылевых частиц: Эксперименты в лаборатории и условиях микрогравитации* Автометрия. Т. 50, № 5. стр. 19-36, 2014.

2. О.Ф. Петров, М.М. Васильев, Й. Тун, К.Б. Стаценко, О.С. Ваулина, Е.В. Васильева, В.Е. Форттов, *Двумерный фазовый переход в сильнонеидеальной пылевой плазме*, ЖЭТФ, том 147, вып.2, стр. 372, 2015.

3. Petrov O.F., Vasiliev M.M., Vaulina O.S., Stacenko K.B., Vasilieva E.V., Lisin E.A., Tun Y., Fortov V.E., *Solid-hexatic-liquid transitions in a two-dimensional system of charged dust particles*, EPL, V. 111, p.45002, 2015.

4. Йе Тун, М.М. Васильев, О.Ф. Петров, *Плавление монослойных пылевых структур в плазме ВЧ разряда*, Труды 57 Всероссийской научной конференции МФТИ с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики», Т.8, стр.101, 2014.

5. Йе Тун, М.М. Васильев, О.Ф. Петров, *Фазовые переходы в квазидвумерных плазменно-пылевых структурах ВЧ разряда*, Труды 56-й Всероссийской научной конференции МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе», том 8, стр. 89, 2013.

6. Petrov O.F., Fortov V.E., Vasiliev M.M., Tun Y., Stacenko K.B., Vaulina O.S., Vasilieva E.V., Lisin E.M., Myasnikov M.I. *Charged dust in plasma under laboratory and microgravity conditions: ordered structures and phase transitions*, Book of abstracts XXIX International Conference on Equations of State for Matter, p. 155, 2014.

7. Vasilieva E.V., Vaulina O.S., Tun Y., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Fortov V.E., *Analysis of the phase state of small-sized monolayer dusty plasma systems using global orientation order parameter*, Book of abstracts XXX International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 2015.

8. O.F. Petrov, V.E. Fortov, M.M. Vasiliev, Y.Tun, K.B. Stacenko, O.S Vaulina, E.V. Vasilieva, E.M. Lisin and M.I. Myasnikov, *Two-stage melting in a monolayer of dust particles in plasma*, 41st EPS Conference on Plasma Physics, p.5.119, 2014.

9. O.F. Petrov, V.E. Fortov, M.M. Vasiliev, Y. Tun, K.B. Stacenko, O.S. Vaulina, E.V. Vasilieva, E.M. Lisin, M.I. Myasnikov, *Phase transitions in quasi-*

two-dimensional dusty plasma structure in RF discharge, Book of abstracts International congress on plasma physics ICPP, p.233, 2014.

10. O.F. Petrov, V.E. Fortov, M.M. Vasiliev, Y. Tun, K.B. Stacenko, O.S. Vaulina, E.V. Vasilieva, E.M. Lisin, M.I. Myasnikov. *Two-dimensional phase transitions in dusty plasma*, Abstracts of 12th Workshop Complex Systems of Charged Particles and their Interaction with Electromagnetic Radiation, (Moscow, Russia, 2014), p.26.

11. O.F. Petrov, V.E. Fortov, M.M. Vasiliev, Y. Tun, K.B. Stacenko, O.S. Vaulina, E.V. Vasilieva, E.M. Lisin, M.I. Myasnikov, *Experimental Studies of Two-dimensional Melting in Dusty Plasma*, Abstracts of International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems SCCS 2014 (Santa Fe, USA, 2014), p.150.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *D.R. Nelson*. Defects and geometry in condensed matter physics. Cambridge University Press, (2002).
2. 40 Years of Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Theory. *Ed. by J.V. Jose* // World Scientific, (2013).
3. *Березинский В. Л.* // ЖЭТФ **59** (3): 907–920. (1970).
4. *Березинский В. Л.* // ЖЭТФ **61** (3): 1144–1156. (1971).
5. *J.M. Kosterlitz and D. J. Thouless* // J. Phys. C: Solid State Phys. **6**, 1181 (1973).
6. *J.M. Kosterlitz* // J. Phys. C: Solid State Phys., **7**, 1046 (1974).
7. *D.R. Nelson and B.I. Halperin* // Phys. Rev. B: Condens. Matter **19**, 2457 (1979).
8. *A. P. Young* // Phys. Rev. B: Condens. Matter **19**, 1855 (1979).
9. *S. T. Chui* // Phys. Rev. B: Condens. Matter **28**, 178 (1983).
10. *D.C. Glattli, E.Y. Andrei, and F.I. B. Williams* // Phys. Rev. Lett. **60**, 420 (1988).
11. *C. A. Murray and R. A. Wenk* // Phys. Rev. Lett. **62**, 1643 (1989).
12. *A. H. Marcus and S. A. Rice* // Phys. Rev. Lett. **77**, 2577 (1996).
13. *R. Seshadri and R. Westervelt* // Phys. Rev. Lett. **66**, 2774 (1991).
14. *K. Zahn and G. Maret* // Phys. Rev. Lett. **85**, 3656 (2000).
15. *R. E. Kusner, J. A. Mann, et.al.* // Phys. Rev. Lett. **73**, 3113 (1994).
16. *O.S. Vaulina, I.E. Drangevski, et.al.* // Phys. Rev. Lett. **97**, 195001 (2006).
17. *R. A. Quinn, C. Cui, J. Goree, J. B. Pieper, et.al.* // Phys Rev. E **53**, 2049 (1996).
18. *A. Melzer, A. Homann, and A. Piel* // Phys. Rev. E **53**, 2757 (1996).
19. *C. A. Knapek, D. Samsonov, et.al.* // Phys. Rev. Lett. **98**, 015004 (2007).
20. *T. E. Sheridan* // Phys. Plasmas. **15**, 103702 (2008).
21. *V. Nosenko, S. K. Zhdanov, et.al.* // Phys. Rev. Lett. **103**, 015001 (2009).
22. *О.С. Ваулина, О.Ф. Петров, В.Е. Фортвов и др.* // Пылевая плазма (эксперимент и теория). Физматлит, Москва (2009).
23. *Complex and Dusty Plasmas Ed. by Fortov V.E., Morfill G.E.*, CRC Press, 2010.

24. *Langmuir I., Mott-Smith H.M.* // Gen. Elec. Rev., **26**, 731 (1923)
25. *Vaulina O.S., Adamovich X.G., et.al.* // Phys Rev E, **77**, 066403 (2008).
26. *Vaulina O.S., Adamovich X.G., et.al.* // Phys Rev E, **77**, 066404 (2008).
27. *Vaulina O.S., Lisin E.A., et.al.*// Phys. Rev. Lett., **103**, 035003 (2009)
28. *Е.В. Васильева, О.С. Ваулина* // ЖЭТФ, том **144**, № 1(7), стр.195-204 (2013)
29. *Vaulina O. S. and Drangevski I. E.*// Physica Scripta **73**, 577 (2006).

Йе Тун

**ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ДВУМЕРНЫХ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ
СТРУКТУРАХ**

Автореферат

Подписано в печать 18.03.15		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч. – изд.л. 1,0	Усл.-печ.л. 1,35
Тираж 100 экз.	Заказ № 61	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2