

На правах рукописи



Яковлев Егор Викторович

**Экспериментальное исследование неравновесных фазовых переходов и
коллективной динамики в конденсированной мягкой материи при помощи
модельных систем**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **кандидат физико-математических наук,
Юрченко Станислав Олегович**

Официальные оппоненты: **Сон Леонид Дмитриевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГАОУ ВО «Уральский
федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
профессор кафедры инноватики и
интеллектуальной собственности

Рыльцев Роман Евгеньевич
кандидат физико-математических наук,
ФГБУН «Институт металлургии Уральского
отделения Российской академии наук»,
старший научный сотрудник лаборатории
аналитической химии

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»**

Защита диссертации состоится «16» октября 2019 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайтах <http://www.bmstu.ru>, <http://www.bmstu-kaluga.ru>

Автореферат разослан «___» 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Лоскутов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Детальное понимание явлений, происходящих в конденсированных средах, имеет большое значение для фундаментальных и прикладных исследований. Одним из эффективных методов прямого экспериментального исследования является использование модельных систем для изучения коллективных явлений и процессов на самом фундаментальном уровне – уровне отдельных частиц. В качестве модельных систем обычно используются коллоидные дисперсии и комплексные плазмы. Отдельные частицы в модельных системах могут быть визуализированы, что открывает путь для детального анализа фундаментальных явлений.

На сегодняшний день, при помощи модельных систем изучен обширный ряд явлений и свойств, таких как плавление и кристаллизация, диффузия, теплоперенос, пластические деформации, спинодальный распад, дислокационная динамика, фазовые переходы кристалл–кристалл и т.д. Интерес к исследованиям с использованием модельных систем за последние 10 лет продолжает интенсивно расти, что подтверждается большим количеством новых публикаций в этой области, а также ростом числа ведущих лабораторий, занимающихся данной тематикой. Особенно перспективной областью применения модельных систем является исследование фазовых переходов (в том числе неравновесных), потому как большинство предыдущих исследований было выполнено для случаев, близких к равновесию, в то время как неравновесное поведение все еще остается недостаточно изученным.

Комплексная (пылевая) плазма и коллоидные суспензии с управляемыми взаимодействиями являются модельными системами, используя которые становится возможным проведение экспериментальных исследований фазовых переходов и корреляций в широком диапазоне параметров состояния. Так как в таких системах, благодаря управлению взаимодействием, можно регулировать параметр связи (неидеальности) и характер межчастичного взаимодействия, они могут с успехом применяться для исследования коллективных явлений в классических кристаллах и жидкостях в широком диапазоне параметров.

Цель диссертационной работы – установление новых экспериментальных режимов и закономерностей неравновесных фазовых переходов в конденсированной мягкой материи на основе исследований с использованием модельных систем – коллоидных суспензий и комплексной (пылевой) плазмы.

Задачи диссертации:

1. Разработка экспериментальных методик, поиск экспериментальных режимов и изучение распространения фронтов неравновесного плавления в кристаллических структурах с использованием 2D комплексной плазмы в качестве модельной системы.
2. Проведение экспериментов с кристаллическими структурами в комплексной плазме, содержащей тепловые дефекты – более тяжелые частицы; изу-

чение комбинированных неустойчивостей и их влияния на фронт неравновесного плавления в таких системах.

3. Проведение систематических экспериментальных работ в двумерной коллоидной суспензии в электрических полях в режиме сильного индуцированного взаимодействия между частицами для построения фазовой диаграммы.
4. Проведение систематических экспериментальных работ с двумерной коллоидной суспензии в электрических полях в режиме слабого индуцированного взаимодействия между частицами для изучения парного потенциала взаимодействия.
5. Проведение экспериментальных работ при помощи комплексной (пылевой) плазмы и коллоидных суспензий, для исследований парных корреляционных функций и проверки интерполяционного метода расчета парных корреляций в кристаллах.

Научная новизна диссертационной работы:

1. На примере 2D комплексной плазмы в качестве экспериментальной модельной системы впервые экспериментально исследованы фронты неравновесного плавления (фронты пламени) и активация тепловых дефектов в кристаллических структурах. Впервые показано, что комбинированные неустойчивости создают условия для активации тепловых дефектов, обеспечивая физическую аналогию с двухстадийными экзотермическими химическими реакциями.
2. На примере 2D комплексной плазмы в качестве экспериментальной модельной системы впервые показано, что тепловые дефекты изменяют кинетику энерговыделения в экзотермических реакциях, что влияет на скорость и структуру фронта неравновесного плавления. Экспериментально впервые показано, что при определенных условиях фронт плавления можно ускорять и даже останавливать.
3. Впервые разработаны экспериментальные методики проведения экспериментов с двумерными коллоидными суспензиями во внешних вращающихся электрических полях, позволившие наблюдать кристаллическое, жидкое и гелеобразное состояние.
4. Впервые проведено сравнение экспериментально полученной фазовой диаграммы коллоидной суспензии диоксида кремния – деионизированная вода во вращающемся электрическом поле с фазовыми диаграммами, полученными при помощи моделирования методом молекулярной динамики, с учетом и без учета многочастичности взаимодействия между частицами. Показано, что фазовая диаграмма, полученная экспериментально, полностью

согласуется с полученной из моделирования с учетом многочастичности, что доказывает многочастичную природу взаимодействия между частицами.

5. Впервые экспериментально показано, что коллоидные суспензии с управляемыми при помощи вращающегося электрического поля взаимодействиями, могут использоваться для исследования таких фундаментальных явлений в двумерных системах, как дислокационная динамика, образование и старение (огрубление) сетки коллоидных гелей, изучение явлений на границе фаз.
6. Впервые экспериментально проверен интерполяционный метод для анализа парных корреляций, определения параметра связи и детального изучения заряда частиц в трехмерных и двумерных коллоидных суспензиях и двумерных плазменных кристаллах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные результаты исследования фронтов неравновесного плавления, ускорения и остановки фронта плавления кристаллической структуры за счет тепловых дефектов в комплексной (пылевой) плазме;
2. Экспериментальная методика и параметры экспериментальных режимов создания термализованной комплексной (пылевой) плазменной системы в жидком состоянии, существующей несколько секунд;
3. Экспериментальные методики и параметры экспериментальных режимов для исследования фазовых переходов в коллоидной суспензии диоксида кремния – деионизированная вода с управляемым взаимодействием при помощи внешних вращающихся электрических полей;
4. Экспериментальные режимы для исследования регулируемого (индуцированного внешним электрическим полем) парного потенциала взаимодействия частиц диоксида кремния в деионизированной воде;
5. Результаты экспериментальных исследований парных корреляционных функций в коллоидных суспензиях во внешних вращающихся электрических полях и плазменных кристаллах; экспериментальная проверка интерполяционного метода для расчета парных корреляций в кристаллах.

Теоретическая значимость обладают найденные режимы сборки коллоидных суспензий для исследований фазовых переходов, поверхностных явлений, дислокационной динамики, гелеобразования и огрубления сетки коллоидных гелей. Теоретической значимостью обладает выявленная аналогия между комбинированными неустойчивостями в комплексной (пылевой) плазме, которые создают условия для термической активации более тяжелых частиц, проявляющих

поведение тепловых дефектов, и химическими реакциями с предварительным равновесием. Другим важным результатом является тот факт, что тепловые дефекты изменяют кинетику энерговыделения в экзотермических реакциях, что влияет на скорость и структуру фронта неравновесного плавления. Полученные результаты открывают перспективы для исследования с пространственным разрешением отдельных частиц сложных процессов горения, роли тепловых дефектов в распространении интенсивных экзотермических реакций и ускорении фронтов пламени в материалах. Новый разработанный подход (без применения лазерного нагрева и любых других внешних воздействий, а также добавления больших частиц) получения комплексной плазмы в жидким состоянии, существующей в устойчивом состоянии в течение достаточно длительного времени обеспечивает возможность экспериментального изучения фундаментальных явлений в комплексных (пылевых) плазмах в жидким состоянии.

Теоретически важен результат сравнения экспериментальной фазовой диаграммы с фазовыми диаграммами, полученными при помощи моделирования методом молекулярной динамики, с учетом и без учета многочастичности. Показано, что фазовая диаграмма, полученная экспериментально, хорошо согласуется с полученной из моделирования с учетом многочастичности, что говорит о многочастичной природе взаимодействия между частицами. Таким образом разработанные экспериментальные методики и найденные экспериментальные режимы открывают путь для детального исследования роли многочастичности в фазовых переходах и других фундаментальных явлениях.

Практической значимостью обладают найденные экспериментальные условия и разработанные подходы для самосборки широкого класса частиц, создания коллоидных кристаллов (которые могут использоваться как фотонно-кристаллические пленки), создания гелевых коллоидных структур в коллоидных суспензиях во внешних вращающихся электрических полях. Практической значимостью работы является предложенная на основе интерполяционного метода методика для детального анализа заряда частиц в различных коллоидных кристаллах смягкими межчастичными взаимодействиями (например, при разных температурах и плотностях).

Достоверность результатов подтверждается корректностью использования методов физики конденсированного состояния, физики мягкой материи, статистической физики и методов экспериментальной физики; полученные результаты согласуются с известными результатами, экспериментальные результаты обладают воспроизводимостью. Достоверность основных результатов диссертации подтверждается согласием результатов, полученных на основе разных подходов, включающих экспериментальные, вычислительные и теоретические.

Личный вклад автора состоит в участии в разработке и создании экспериментальных стендов и установок, в подготовке и проведении экспериментальных работ, отладке методик и протоколов проведения экспериментальных исследований, в участии в постобработке экспериментальных результатов и последующем анализе, обсуждении и интерпретации результатов. Все представленные

результаты получены автором лично, либо при непосредственном участии.

Результат диссертационной работы представляет собой решение актуальной для физики конденсированного состояния научной задачи установления экспериментальных режимов для исследования фазовых переходов и других фундаментальных явлений в модельных системах с регулируемым межчастичным взаимодействием.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на 11 выступлениях, в т.ч., на следующих конференциях и семинарах: Международная конференция «The 5th International Soft Matter Conference (ISMC2019)» (Edinburgh, United Kingdom, 2019); Международная научная школа «Bad Honnef School on Physics of Strongly Coupled Systems» (Bad Honnef, 2019); Международная научная школа «Bad Honnef School on Physics of Strongly Coupled Systems» (Bad Honnef, 2019); International Conference «Laser Optics – 2018» (Санкт - Петербург, 2018); Международная конференция «ФизикА.СПб» (Санкт - Петербург, 2018); Международная семинар «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физики конденсированного состояния» (Москва, 2018); Saratov Fall Meetings 2018: Symposium Optics & Biophotonics (Саратов, 2018); Международный симпозиум «Progress In Electromagnetics Research Symposium» (Санкт - Петербург, 2017); Международная семинар «Фундаментальные и прикладные проблемы физики мягкой материи» (Москва, 2016); Всероссийская конференция «Проблемы физики твердого тела и высоких давлений» (пос. Вишневка, 2016); Международный симпозиум с элементами научной школы «Комплексная (пылевая) плазма: Междисциплинарные исследования» (Москва, 2016).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 научных работах индексируемых в Scopus / Web of Science, в том числе 6 в журналах рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов научных работ.

Среди научных изданий, в которых опубликованы результаты диссертации ведущие мировые журналы (в том числе входящие в Q1, WoS/Scopus), такие как Scientific Reports [1], Physical Review E [2], Physical Review Letters [3], Journal of Physics D: Applied Physics [4], Journal of Applied Physics [5] Успехи физических наук [6], Proceedings SPIE [7], Journal of Physics: Conference Series [8], IEEE Xplore [9].

О высоком интересе научного сообщества и актуальности результатов диссертации косвенно свидетельствует то, что статья [1] стала одной из «Top 100 Read Articles 2017» Scientific Reports (Топ 100 самых читаемых статей 2017 года). Всего автор имеет 18 научных публикаций, индексируемых в Scopus и в Web Of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 155 страниц, 41 рисунок, 2 таблицы. Список литературы включает 255 источников.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко обосновывается актуальность работы, сформулирована цель, перечислены положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна, достоверность и практическая значимость результатов, личный вклад, апробация работы и публикация материалов диссертации, содержание по главам.

Глава 1 посвящена обзору результатов в области применения модельных систем комплексной (пылевой) плазмы и коллоидных супензий с управляемыми взаимодействиями.

В разделе 1.1 были представлены основные экспериментальные результаты последнего десятилетия, посвященные исследованиям волновых мод и неустойчивости связанных мод в двумерных кристаллических структурах в комплексной плазме. Продемонстрировано формирование гибридных мод и запуска неустойчивости связанных мод из-за присутствия ионных следов. Проанализированы

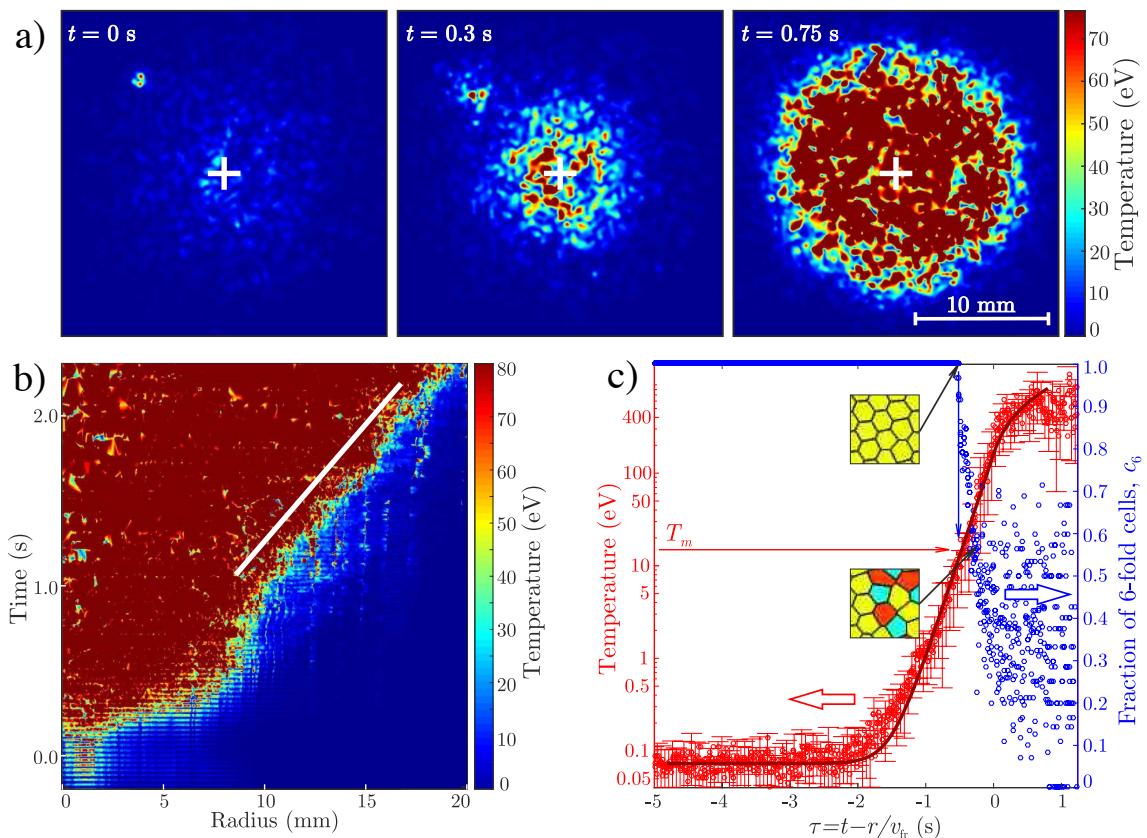


Рис. 1. a) Изменение кинетической температуры микрочастиц во время плавления, индуцированного неустойчивостью связанных мод (вид сверху). b) Радиальное расширение горячей зоны со временем. В момент времени $t \sim 1$ с фаза воспламенения из-за кристаллической НСМ изменяется на устойчивое расширение, поддерживаемое жидкостной НСМ (обозначено белой сплошной линией). c) Автомодельные профили кинетической температуры частиц $T(\tau)$ (левая ось) и доля ячеек с шестью вершинами $c_6(\tau)$ (правая ось). Символы соответствуют экспериментальным результатам, а сплошная линия – теоретический расчет [2]

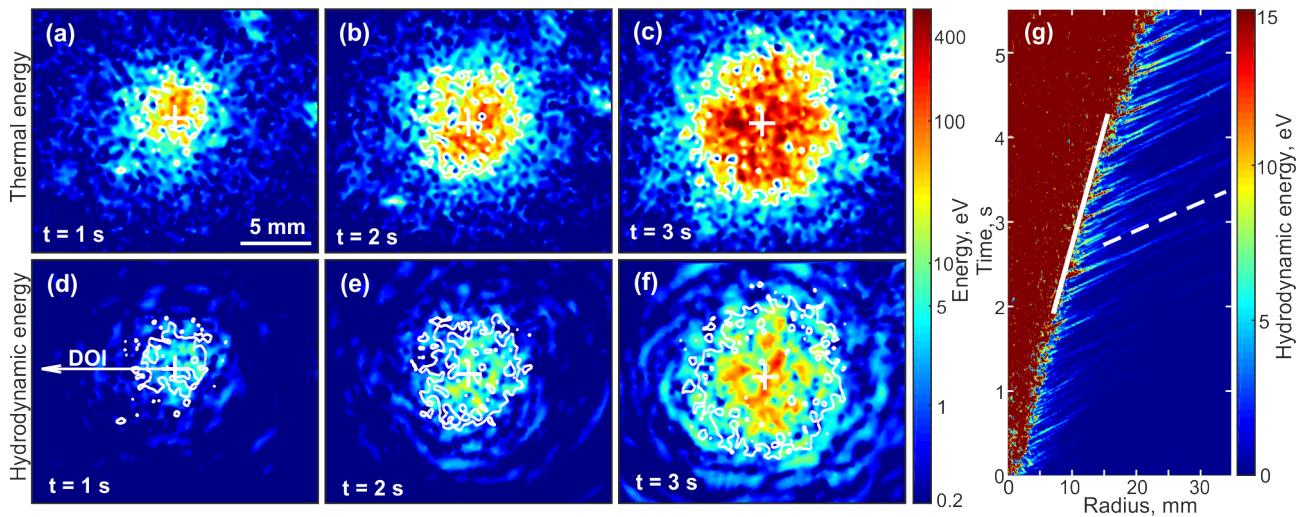


Рис. 2. Генерация звуковой волны комплексной (пылевой) плазмой в жидким состоянии: Эволюция а) – с) тепловой и д) – ф) гидродинамической энергий частиц. Белые контуры в а) – ф) отмечают расплавленную область, где $T > T_m \simeq 12$ эВ. г) Эволюция гидродинамической энергии в радиальном направлении. Белые сплошные и пунктирные линии соответствуют скорости фронта пламени, $v_{fr} = 3.61 \pm 0.2$ мм/с, и продольная скорость звука, $C_L = 30 \pm 0.3$ мм/с, соответственно [3]

различные стадии неустойчивости связанных мод, а также неустойчивость связанных мод, индуцированная механическим воздействием.

В разделе 1.2 изложены основные методы и подходы для использования коллоидных супензий с управляемыми взаимодействиями в качестве модельных систем для изучения фазовых переходов и других фундаментальных явлений в конденсированных средах. Проведен обзор различных методов индуцирования взаимодействия между частицами в коллоидных супензиях и проанализированы преимущества и недостатки методов, отдельно выделена методика самосборки при помощи внешних электрических вращающихся полей. Описан механизм регулируемых взаимодействий в коллоидных структурах во внешних электрических полях, а также метод идентификации фаз в двумерных системах. Рассмотрена возможность применения самосборки коллоидных кристаллов во внешних вращающихся полях в интересах создания фотонных кристаллов. Показано, что самосборка в коллоидных супензиях во внешних электрических полях может применяться для создания перспективного материала – фотонного кристалла.

В разделе 1.3 сформулированы цель и задачи диссертации.

Глава 2 посвящена экспериментальному исследованию, при помощи комплексной (пылевой) плазмы, таких междисциплинарных явлений в физике конденсированного состояния и физики мягкой материи, как фронты неравновесного плавления (горения), термоакустическая неустойчивость, тепловая активация дефектов и динамика жидкости.

В разделе 2.1 описывается экспериментальная установка GEC для прове-

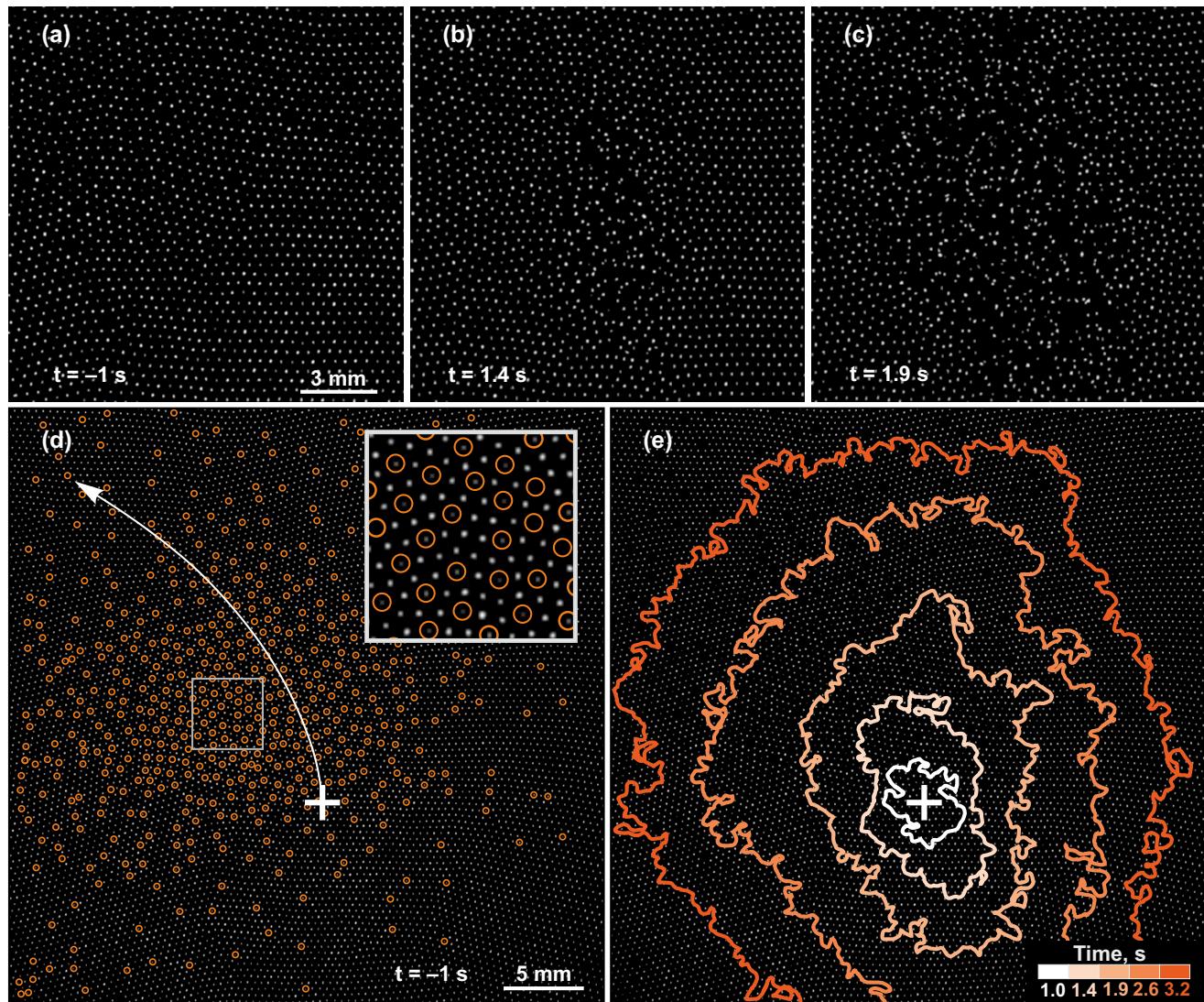


Рис. 3. Эксперименты с направленным фронтом неравновесного плавления (пламени): а), б) и с) фотографии системы монослоя в пылевой плазме в моменты времени $t = -1$; 1.4 и 1.9 с соответственно, где $t = 0$ с – это момент начала горения. д) Снимок кристалла с пространственно-неоднородным распределением дефектов в кристалле (оранжевые символы) перед плавлением. Область воспламенения отмечена белым крестом, а изогнутая стрелка показывает ориентацию оси анизотропии для фронтов, показанных в е). На вставке показана увеличенная область из серой рамки. е) Фронты, соответствующие средней тепловой энергии частиц $T = 20$ эВ в различные моменты времени

дения работ с комплексной (пылевой) плазмой. Так же в этом разделе описываются детали экспериментов, проанализированных в разделе 2.4. В разделе 2.1.3 описывается методика определение заряда частицы и параметра экранировки системы.

В разделе 2.2 представлены результаты экспериментального исследования процесса неравновесного плавления в комплексной (пылевой плазме), показанные на Рис.1. Неустойчивость связанных мод возникает в кристалле и приводит

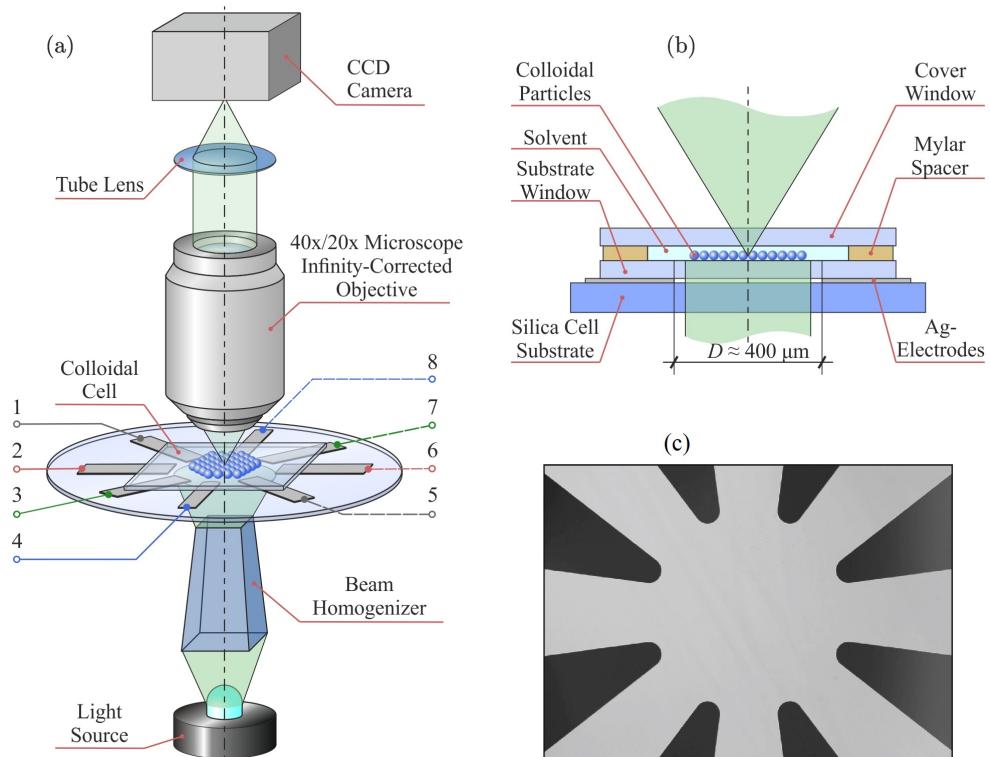


Рис. 4. Схематическое изображение экспериментальной установки для управляемой самосборки двумерных коллоидных суспензий во вращающихся электрических полях: на панели а) показана общая схема установки с деталями, представленными в б); на панели с) представлена фотография подложки с восемью электродами [1]

к неравновесному плавлению, воспроизводящему тепловую активацию среды. На основе экспериментов демонстрируется физическая аналогия между возникающей НСМ в плазменном кристалле и фронтом пламени в обычных твердых телах.

В разделе 2.3 экспериментально изучена термоакустическая неустойчивость. На Рис. 2 и в разделе показано, что в комплексной (пылевой) плазме обеспечивается положительная тепловая обратная связь, что приводит к генерации звука в области расплавленного плазменного кристалла. Результаты доказывают физическую аналогию между коллективной флуктуационной динамикой в реактивных средах и системах с невзаимными эффективными взаимодействиями, демонстрирующими активационное тепловое поведение.

В разделе 2.4 показаны экспериментальные результаты изучения активации дефектов, введенных в двумерный плазменный кристалл, и их роль в распространении фронтов пламени в твердых телах. Продемонстрировано явление, когда акустические пульсации, возникающие в результате термоакустической неустойчивости при распространении фронтов пламени, вызывают интенсивный разогрев (тепловой взрыв) вокруг дефектов. Показано, что дефекты снижают порог температуры активации, изменяют кинетику выделения энергии и влияют на форму фронта неравновесного плавления (пламени), в то время как

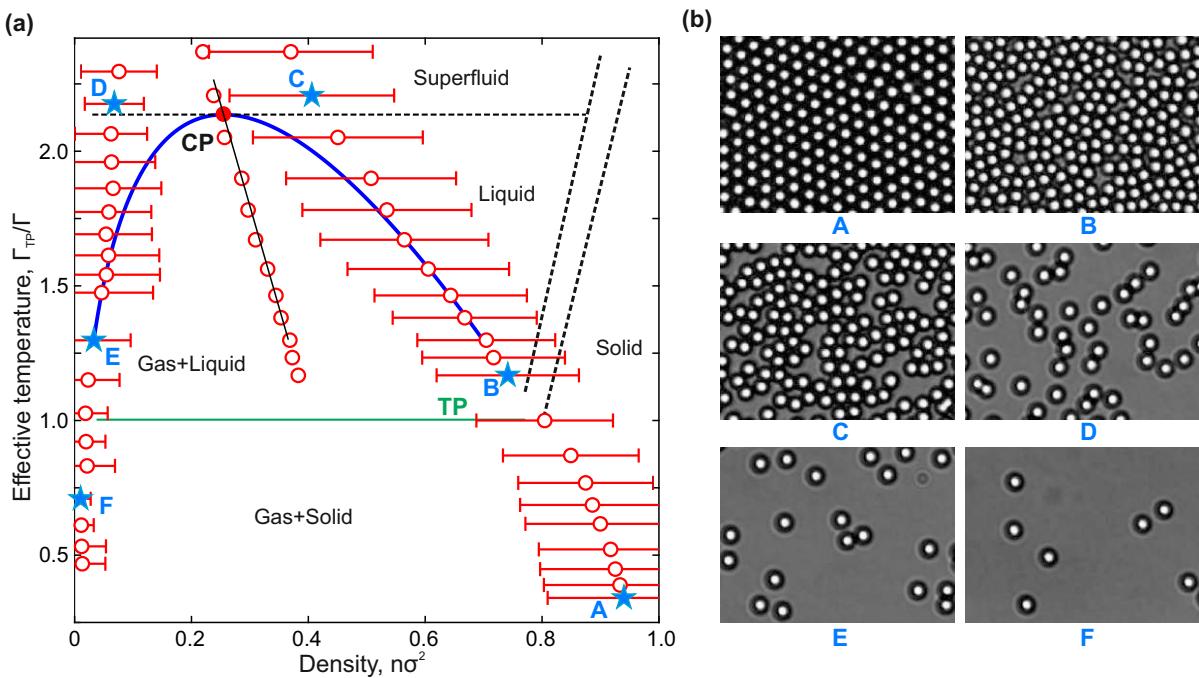


Рис. 5. Фазовая диаграмма 2D коллоидной супензии во внешнем вращающемся электрическом поле: а) фазовая диаграмма, б) снимки, соответствующие различным состояниям на фазовой диаграмме, обозначенным буквами А–F. Используются частицы диоксида кремния с диаметром $\sigma = 2.12$ мкм в деионизированной воде, n – поверхностная плотность частиц. Эффективная температура нормирована к ее значению в тройной точке (TP), $\Gamma_{TP}/\Gamma = (V_{TP}/V)^2$, где V – величина амплитуды переменного напряжения, приложенного к электродам

соответствующее тепловое поведение выявляет особенности, которые приписываются экзотермическим двухступенчатым химическим реакциям (активация с предварительным равновесием). Используя экспериментальную систему, продемонстрировано, что фронты неравновесного плавления (пламени) могут быть направлены (см. Рис. 3) и даже остановлены дефектами.

В разделе 2.5 представлена экспериментальная методика для получения комплексной (пылевой) плазмы в жидком состоянии, существующей в течение нескольких секунд. Этот подход (без внешнего воздействия и дополнительных частиц) основан на кристаллической неустойчивости связанных мод.

Раздел 2.6 обобщает основные результаты главы.

Глава 3 организована следующим образом.

В разделе 3.1 описывается экспериментальная методика для регулируемой самосборки частиц в двумерных (2D) коллоидных супензиях. Описываются основные параметры и составляющие экспериментальной установки, показанной на Рис. 4. Демонстрируются типовые возможности по самосборке кластеров в 2D супензии, индуцированной вращающимся электрическим полем. В разделе 3.2 приведены детали подготовки и проведения эксперимента. В разделе 3.3 демонстрируется, как разработанная экспериментальная технология мо-

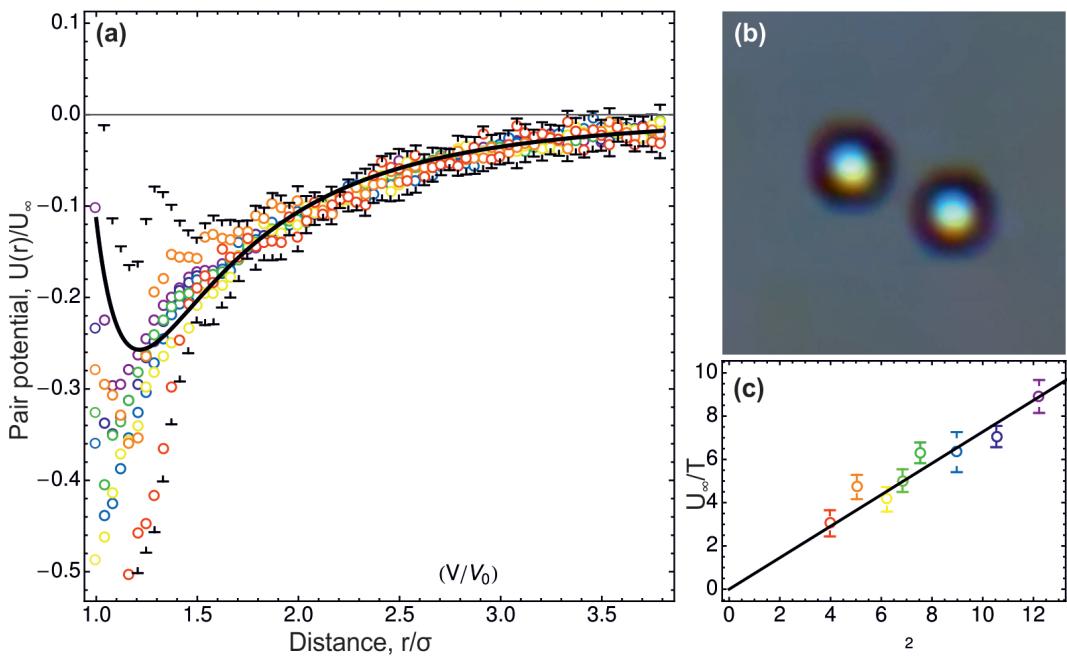


Рис. 6. Сравнение теоретической и экспериментально-измеренной формы (электрически-индуцированного) регулируемого парного потенциала взаимодействия частиц диоксида кремния в деионизированной воде. а) Вид парного потенциала, б) фото пары коллоидных частиц в разряженной суспензии из эксперимента, с) зависимость интенсивности регулируемого взаимодействия от амплитуды переменного напряжения на электродах. Точки соответствуют измерениям при разных значениях напряжения на электродах (нормированы на $V_0 = 100$ В)

может быть использована для исследований с пространственным разрешением отдельных частиц. Приводится экспериментальная фазовая диаграмма коллоидной системы с регулируемыми межчастичными взаимодействиями, индуцированными вращающимся электрическим полем, показанная на Рис. 5. Фазовая диаграмма включает области, соответствующие газовому, жидкому, кристаллическому и сверхкритическому состояниям. Показано сравнение экспериментальной фазовой диаграммы с фазовыми диаграммами, полученными при помощи моделирования методом молекулярной динамики, с учетом и без учета многочастичности. Показано, что фазовая диаграмма, полученная экспериментально, хорошо согласуется с полученной из моделирования с учетом многочастичности, что доказывает многочастичную природу электрически-регулируемых взаимодействий между частицами. Затем показаны результаты экспериментального получения парного потенциала регулируемого взаимодействия между двумя частицами во вращающемся электрическом поле (см. Рис. 6). Сравнение теоретической и экспериментально-измеренной формы потенциала показало прекрасное согласие в дальней зоне.

В заключении главы, в разделе 3.4 и 3.5 обсуждаются возможные области применения двумерных коллоидных суспензий с управляемым вращающимся электрическим полем притяжением в качестве инструмента для изучения фун-

даментальных явлений на кинетическом уровне.

Применением коллоидных суспензий с управляемым притяжением является изучение с разрешением отдельных частиц (на микроуровне) гелеобразования и явлений в гелевых коллоидных структурах. В разделе 3.4 показаны результаты пилотных экспериментов с созданием модельных коллоидных гидрогелей, и обсуждается возможность исследования огрубления гелевой сетки (старения) и закалки в таких системах. В разделе 3.5 обсуждаются возможности применения экспериментальной системы для исследований дислокационной динамики. В пилотных экспериментальных работах, посвященных дислокационной динамике изучалось влияние эффективной температуры на скорость и интенсивность появления дислокаций. Так же было установлено, что режимы плавления (поверхностный или объемный) сменяются при увеличении размера кластера.

Раздел 3.6 обобщает основные результаты главы.

В Главе 4 впервые экспериментально протестировано применение интерполяционного метода (ИМ) для получения парных корреляций в кристаллах. В разделе 4.1 сформулирована прямая и обратная задача для применения ИМ в классических кристаллах. В разделе 4.2 описаны проведенные эксперименты с двумерными коллоидными кристаллами (раздел 4.2.2) и с двумерными комплексными (пылевыми) плазмами в кристаллическом состоянии (раздел 4.2.3), а также описаны экспериментальные результаты работы с трехмерными коллоидными кристаллами в неполярном сольвенте (раздел 4.2.1). Эти системы предоставляют уникальную возможность исследовать классические кристаллы с различным типом взаимодействия частиц (от мягких до твердых сфер) с пространственным разрешением отдельных частиц. В разделе 4.3 показано, что ИМ можно эффективно использовать для получения параметров парного взаимодействия между частицами (которое считалось отталкиванием Юкавы) путем анализа экспериментальных парных корреляционных функций. Результаты экспериментальных и теоретических исследований, показанные на Рис. 7, находятся в согласии друг с другом и подтверждают эффективность ИМ для анализа взаимодействий и корреляций в различных кристаллических системах. Раздел 4.4 обобщает основные результаты Главы 4.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Детальное понимание явлений, происходящих в классической конденсированной среде, имеет большое значение для фундаментальных и прикладных исследований. В настоящей диссертации, при помощи разработанных экспериментальных методик и найденных экспериментальных режимов в модельных системах комплексной (пылевой) плазмы и коллоидных суспензий с управляемыми взаимодействиями (во внешних вращающихся электрических полях), были экспериментально изучены неравновесные фазовые переходы и коллективная динамика кристаллов и жидкостей, активация тепловых дефектов, ускорение и остановка фронтов неравновесного плавления дефектами, фазовые переходы в

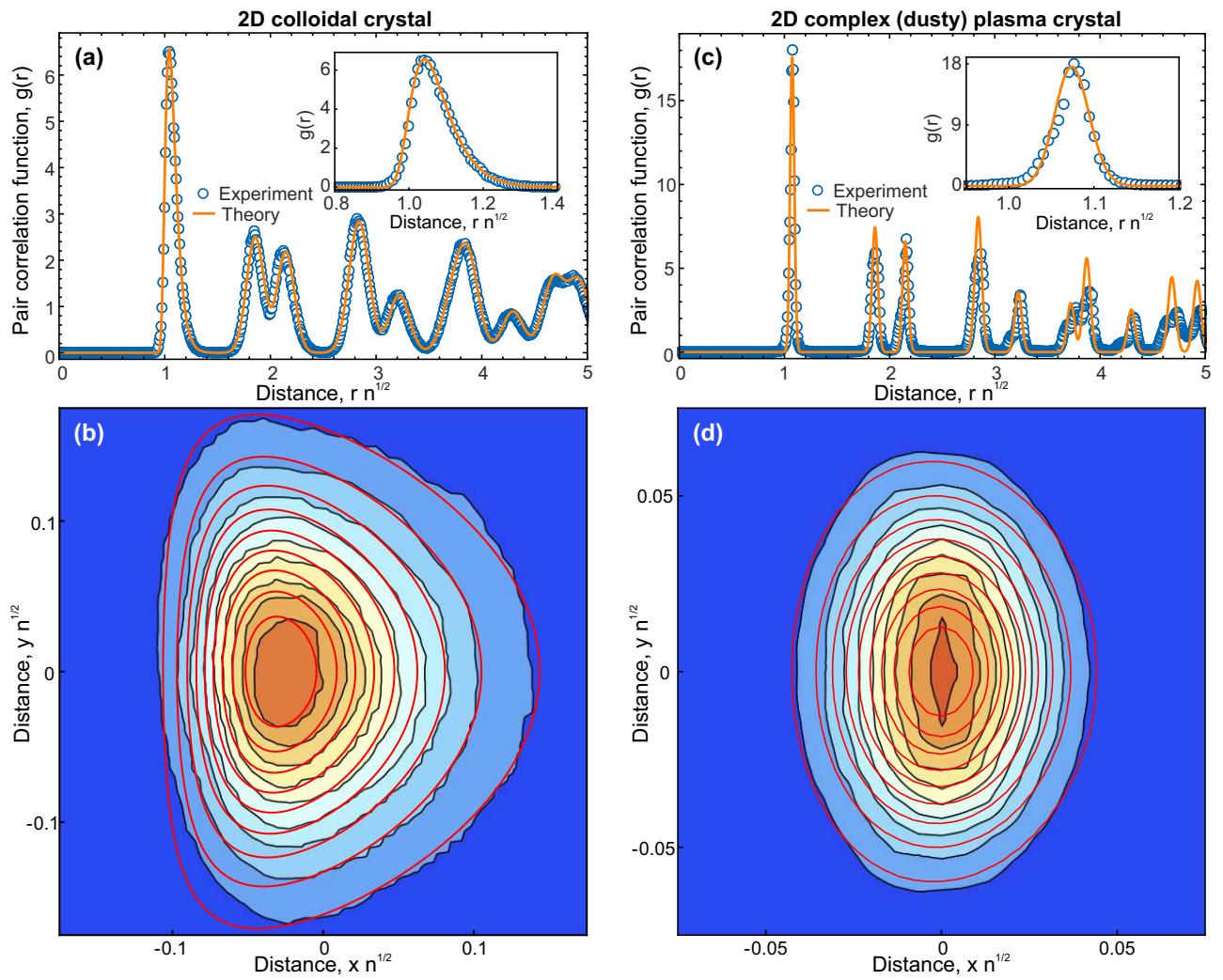


Рис. 7. Парные корреляционные функции в 2D кристаллах: а) и с) парные корреляционные функции $g(r)$ в исследованных коллоидных и плазменных кристаллах соответственно. Синие символы – экспериментальные результаты, оранжевые сплошные линии – теоретическая аппроксимация $g(r)$ при помощи ИМ, на вставках показано крупные планы первых корреляционных пиков. б) и д) представляют корреляционный пик $p_1(\mathbf{r})$, соответствующий ближайшему соседу в коллоидном и плазменном кристалле соответственно. Черные контуры – экспериментальные изолинии $p_1(\mathbf{r})$, красные контуры соответствуют изолинии теоретической аппроксимации $p_1(\mathbf{r})$, полученной при помощи ИМ

коллоидной системе диоксид кремния – дейонизованная вода, парные взаимодействия, образование коллоидных гелей, дислокационная динамика, а также анализ парных корреляций и параметров взаимодействий в двумерных и трехмерных системах.

Основные результаты диссертации:

1. Экспериментально исследовано распространение фронтов неравновесного плавления в плазменных кристаллах, сопровождающихся генерацией звука за счет термоакустической неустойчивости. Показано, что эти явления

демонстрируют аналогию с поведением химически активных сред.

2. Была выявлена аналогия между комбинированными неустойчивостями в комплексной (пылевой) плазме и химическими реакциями с предварительным равновесием. Впервые показано, что комбинированные неустойчивости (кристаллическая НСМ – жидкостная НСМ – термоакустическая неустойчивость – тепловой взрыв) создают условия для термической активации более тяжелых частиц, которые проявляют поведение тепловых дефектов, обеспечивая физическую аналогию с двухстадийными экзотермическими химическими реакциями (реакции с предварительным равновесием).
3. Показано, что тепловые дефекты изменяют кинетику энерговыделения в экзотермических реакциях активационного плавления, что влияет на скорость и структуру фронта неравновесного плавления (пламени). Найденные экспериментальные режимы и полученные результаты открывают перспективы для изучения с разрешением отдельных частиц (на микроскопическом уровне) сложных процессов горения (например, сочетание термической активации с плавлением и химическими реакциями), роли тепловых дефектов в распространении интенсивных экзотермических реакций и ускорении фронтов пламени в материалах.
4. Описан новый подход (без применения лазерного нагрева и любых других внешних воздействий, а так же добавления больших частиц) получения комплексной плазмы в жидком состоянии, существующей в устойчивом состоянии в течение достаточно длительного времени. Данный метод обеспечивает простой подход для экспериментального изучения комплексных (пылевых) плазм в жидком состоянии и фундаментальных явлений в них.
5. При помощи экспериментальной методики изучены регулируемые парные взаимодействия между частицами во вращающихся электрических полях. Проведены исследования фазовой диаграммы 2D системы частиц с регулируемым (дальнодействующим притягивающим и короткодействующим отталкивающим) межчастичным взаимодействием. Проведено сравнение экспериментальной фазовой диаграммы с фазовыми диаграммами, полученными при помощи моделирования методом молекулярной динамики, с учетом и без учета многочастичности. Показано, что фазовая диаграмма, полученная экспериментально, хорошо согласуется с полученной из моделирования с учетом многочастичности, что говорит о многочастичной природе взаимодействия между частицами и открывает путь для будущих исследований роли многочастичности в фазовых переходах и других фундаментальных явлениях.
6. Продемонстрированы перспективы области применения двумерных коллоидных супензий с управляемым вращающимся электрическим полем при-

тяжением в качестве инструмента для изучения фундаментальных явлений на кинетическом уровне. Показано, как разработанные экспериментальные методики можно применить систему для исследования дислокационной динамики. Продемонстрированы пилотные эксперименты, посвященные дислокационной динамике, в которых изучалось влияние эффективной температуры на скорость и интенсивность появления дислокаций. Из экспериментов было установлено, что режимы плавления (поверхностный или объемный) сменяются при увеличении размера кластера. Также показано что коллоидные суспензии с управляемым притяжением могут применяться для изучения с разрешением отдельных частиц (на микроуровне) гелеобразования и явлений в гелевых структурах. Показаны результаты пилотных экспериментов, посвященных созданию модельных коллоидных гидрогелей, и исследованию огрубления гелевой сетки (старения) закалки в таких системах.

7. Получена форма парной корреляционной функции в классических кристаллах при помощи интерполяционного метода, используя экспериментальные исследования с разрешением отдельных частиц с 3D коллоидными кристаллами с мягким отталкиванием Юкавы, 2D коллоидными кристаллами с отталкиванием твердых сфер, и 2D плазменными кристаллами с мягким отталкиванием Юкавы. Установлено, что теория хорошо согласуется с экспериментами во всех исследованных кристаллах, охватывающих случаи трехмерных и двумерных систем с взаимодействиями мягких и жестких сфер, описываемыми отталкиванием Юкавы. Для двумерных плазменных кристаллов теория согласуется с экспериментами на малых расстояниях, но на больших расстояниях возникают расхождения из-за деформаций кристалла. Для трехмерных и двумерных коллоидных кристаллов теоретическое описание парных корреляционных функций отлично согласуется с экспериментальными наблюдениями.
8. Продемонстрировано, что предложенный подход на основе ИМ для анализа $g(r)$ может быть использован для получения параметра связи в трехмерных (мягких) коллоидных кристаллах и для детального изучения заряда частиц при различных условиях (плотность, температура и т.д.). В двумерных кристаллах эксперименты доказали, что $g(r)$ на основе ИМ хорошо описывает парные корреляции, даже если эффекты ангармонизма значительны, а ближайшие корреляционные пики существенно негауссовые. В двумерных плазменных кристаллах параметр связи может быть получен путем аппроксимации экспериментальной парной корреляционной функции полученной на основе ИМ $g(r)$, аналогично трехмерным мягким коллоидным кристаллам.

Публикации по результатам диссертации

1. Tunable two-dimensional assembly of colloidal particles in rotating electric fields / Yakovlev E. V. et al. // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, No. 1. P. 13727. (0,63 п.л. / 0,32 п.л.)
2. Flame propagation in two-dimensional solids: Particle-resolved studies with complex plasmas / Yakovlev E. V. et al. // *Physical Review E*. 2017. Vol. 96. P. 043201. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)
3. Thermoacoustic instability in two-dimensional fluid complex plasmas / Yakovlev E. V. et al. // *Physical Review Letters* 2018. Vol. 121. P. 075003. (0,33 п.л. / 0,16 п.л.)
4. Enhanced third-harmonic generation in photonic crystals at band-gap pumping / Yakovlev E. V. et al. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. Vol. 50, No. 5. P. 055105. (0,33 п.л. / 0,16 п.л.)
5. Band-gap nonlinear optical generation: The structure of internal optical field and the structural light focusing / Yakovlev E. V. et al. // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115, No. 21. P. 213505. (0,56 п.л. / 0,28 п.л.)
6. Experimental studies of two-dimensional complex plasma crystals: waves and instabilities / Yakovlev E. V. et al. // *Physics-Uspekhi*, 2019, DOI: 10.3367/UFNe.2019.01.038520. (1,63 п.л. / 0,82 п.л.)
7. Colloidal suspensions in external rotating electric field: experimental studies and prospective applications in physics, material science, and biomedicine / Yakovlev E. V. et al. // *Proceedings of SPIE*. 2018. Vol. 10716. P. 10716–10716-7. (0,44 п.л. / 0,22 п.л.)
8. Microscopy of tunable assembly of cells in external alternating electric fields / Yakovlev E. V. et al. // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2018. (0,06 п.л. / 0,03 п.л.)
9. Tunable colloids: Experimental complex for studying generic phenomena in classical condensed matter / Yakovlev E. V. et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1135. P. 012039. (0,44 п.л. / 0,22 п.л.)

Подписано в печать 03.07.2019

Объем: 1 усл. п. л.

Тираж: 100 экз. Заказ №_____

Отпечатано в типографии «11-й ФОРМАТ»

115230, г. Москва, Варшавское ш., 36

(499)788-78-56 www.autoreferat.ru