

На правах рукописи

Абрашитов Андрей Владимирович

**СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ
КРИСТАЛЛОВ В ПОЛЯХ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

Специальности:

01.04.07 – физика конденсированного состояния

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

- Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор ***Псахье Сергей Григорьевич***
- доктор физико-математических наук
Зольников Константин Петрович
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор ***Козлов Эдуард Викторович***
- доктор физико-математических наук,
профессор ***Шаповалов Александр Васильевич***
- Ведущая организация: ***Учреждение Российской академии наук Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва***

Защита состоится «30» июня 2011 г. в 14³⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.267.07 в Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «27» мая 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.267.07
доктор технических наук,
старший научный сотрудник



И.В.. Ивонин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Комплексная (пылевая) плазма - это газовая плазма, состоящая из электронов, ионов и нейтральных атомов, которая дополнительно содержит пылевые частицы размером от 10 нм до 10 мкм, т.е. конденсированную дисперсную фазу (КДФ). При этом ее свойства гораздо разнообразнее свойств классической плазмы, состоящей из электронов и ионов. Поэтому, изучение различных состояний КДФ и физических явлений в них представляет значительный интерес с точки зрения получения фундаментальных знаний о состояниях классических, макроскопических и микроскопических дисперсных систем. Широкая распространенность в природе и выраженные нелинейные свойства делают исследование фундаментальных основ поведения комплексной плазмы, безусловно, актуальным и перспективным научным направлением. В силу многообразия проявлений система «плазма с КДФ» находится на стыке физики конденсированного состояния и теоретической физики. Поэтому, методы исследования, применяемые в физике конденсированного состояния и теоретической физике, широко используются при изучении пылевой плазмы. Для теоретического описания поведения комплексной плазмы используются различные модели: метод “обобщенной гидродинамики”, кинетический подход, метод, основанный на приближении квазилокализованного заряда. В то же время в работах академика Фортова В.Е. отмечается, что в качестве критерия достоверности и применимости различных теоретических подходов можно использовать численное моделирование комплексной плазмы, в частности, выполненное в рамках молекулярной динамики.

Применение различных методов компьютерного моделирования (метода Монте-Карло, метода молекулярной динамик, Particle-in-cell методов) позволяет достаточно точно описывать коллективное поведение плазменно-пылевых частиц и влияние разного рода внешних воздействий на изучаемую систему. Отметим, что на основе компьютерного моделирования можно исследовать структуру и поведение плазменно-пылевых систем в произвольных удерживающих полях при различных внешних воздействиях, а также получать детальную информацию об изучаемой системе, которая недоступна в эксперименте. При этом во многих работах моделирование проводится применительно к плазменно-пылевым кристаллам небольшого размера. Если число пылевых частиц в КДФ не превышает тысячи, то такую систему в литературе принято называть «плазменно-пылевой кластер» или «кластер Юкавы».

Несмотря на интенсивно развивающиеся в последние годы комплексные исследования плазменно-пылевых систем, многие их фундаментальные свойства и закономерности поведения остаются недостаточно изученными. Эффекты, связанные с коллективным взаимодействием между пылевыми частицами; структура и поведение систем с разнородными пылевыми компонентами; отклик пылевой плазмы на различные внешние воздействия и так далее. Это связано как с ограниченностью возможностей экспериментального оборудования, так и со сложной нелинейной природой плазменно-пылевых систем.

В связи с вышеизложенным, **целью** диссертационной работы является изучение структуры плазменно-пылевых систем в удерживающих полях различной конфигурации и их отклик на внешние воздействия.

В соответствии с указанной целью в диссертационной работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследовать структуру однокомпонентных плазменно-пылевых кристаллов в анизотропных ловушках.
2. Изучить влияние конфигурации удерживающего поля на структуру многокомпонентных плазменно-пылевых кристаллов.
3. Изучить возможности управления структурой кристаллического состояния плазмы с КДФ.
4. Исследовать поведение плазмы с КДФ при скачкообразном изменении внешнего удерживающего поля.
5. Изучить поведение однокомпонентных плазменно-пылевых кристаллов наносекундных импульсных электрических воздействиях.

Научная новизна

1. Впервые показано, что можно управлять структурой бикомпонентных плазменно-пылевых кристаллов в основном состоянии, меняя соответствующим образом конфигурацию удерживающей ловушки или подбирая пылевые частицы с определенными параметрами (размером и массовой плотностью).
2. Показано, что структура и форма одно- и бикомпонентных плазменно-пылевых кристаллов существенно зависят от степени анизотропии удерживающего поля. Установлено, что увеличение числа пылевых частиц в плоском плазменно-пылевом кристалле приводит не только к увеличению числа оболочек, но и трансформации моделируемого кристалла из двумерного в трехмерное состояние.
3. Установлено, что при скачкообразном изменении удерживающего поля в плазменно-пылевом кристалле генерируются колебания, частота которых определяется конечной величиной удерживающего поля. Обнаружено, что характер колебаний плазменно-пылевого кристалла в случае всестороннего и анизотропного нагружений существенно различается.
4. На основе молекулярно-динамического подхода рассчитаны и построены амплитудно-частотные характеристики плазменно-пылевого кристалла при электроимпульсном нагружении. Полученные амплитудно-частотные характеристики позволяют эффективно определить динамику изменения заряда пылевых частиц в процессе нагружения и последующих осцилляциях.

Научная и практическая ценность

В рамках проведенных исследований показана возможность и способы целенаправленного изменения внутренней структуры и свойств плазменно-пылевого кристалла. Меняя свойства пылевых частиц (плотность, размеры), можно добиваться различного характера их сегрегации в исследуемой многокомпонентной системе. Показано, что, варьируя конфигурацию удерживающего поля, можно существенно изменять структуру плазменно-пылевого кристалла, переводя его из трехмерного в двумерное или одномерное состояние. При этом изменяется число и заселенность его оболочек. Полученные результаты улучшают понимание многообразия структур плазменно-пылевых систем.

Исследование поведения плазменно-пылевого кристалла при скачкообразном изменении величины удерживающего поля представляет научно-практический интерес, поскольку позволяет определить амплитудно-частотные характеристики, а также характер отклика и изменения структуры системы.

Результаты моделирования поведения плазменно-пылевого кристалла при электроимпульсном воздействии могут быть использованы для оценки заряда пылевых частиц и характера его изменения в процессе нагружения и последующей релаксации.

Полученные результаты углубляют наши знания о физической природе плазменно-пылевых систем и способах целенаправленного изменения их свойств.

Положения, выносимые на защиту

1. Характер изменения структуры плазменно-пылевого кристалла при внесении частиц разных сортов.
2. Закономерности изменения структуры одно- и бикомпонентных плазменно-пылевых кристаллов при изменении конфигурации удерживающего поля.
3. Способы управления структурой кристаллического состояния плазменно-пылевых кристаллов.
4. Особенности поведения плазменно-пылевого кристалла при скачкообразном всестороннем и анизотропном изменении удерживающего поля.
5. Результаты моделирования поведения плазменно-пылевого кристалла при электроимпульсном воздействии.

Обоснованность и достоверность результатов, представленных в диссертационной работе и сформулированных на их основе выводов, обеспечиваются корректностью постановок рассматриваемых задач и методов их решения; хорошо апробированными потенциалами межчастичного взаимодействия, позволяющими с высокой точностью описывать свойства плазменно-пылевых систем, которые наиболее важны при решении поставленных в диссертации задач; надежно протестированными компьютерными программами; хорошим согласием расчетных данных с опубликованными результатами работ других авторов и имеющимися экспериментальными данными.

Апробация работы

Результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной конференции по физической мезомеханике (г. Томск, 2006); Международной конференции «Advanced problems in Mechanics» - АРМ (г. Санкт Петербург, 2008); Международной конференции по физической мезомеханике (г. Томск, 2008); Международной конференции «Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter» (Эльбрус, 2009); Международной конференции «Advanced problems in Mechanics» - АРМ (г. Санкт Петербург, 2009); Международной конференции «Equations of State for Matter» (Эльбрус, 2010); Международной конференции «European Physical society conference on Plasma Physics» (г. Дублин, 2010); Международной конференции «Advanced problems in Mechanics» - АРМ (г. Санкт Петербург, 2010); Международном симпозиуме по высокоточной электронике (г. Томск, 2010); Международной конференции «Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter» (Эльбрус, 2011).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, в том числе в 5 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и списка литературы, из 137 наименований. Общий объем - 114 страниц, включая 34 рисунка и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, отмечены полученные результаты, показана их научно-практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, дана краткая характеристика разделов диссертации.

Первый раздел носит обзорный характер. Представлен исторический обзор научных работ по изучению пылевой плазмы. Проведена адаптация метода молекулярной динамики для решения задач, поставленных в диссертационной работе, в том числе для описания многокомпонентной пылевой плазмы в удерживающих полях различной конфигурации. Основные уравнения молекулярной динамики представлены в виде:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v},$$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F},$$

где x , v , m и F – координата, скорость, масса частицы и действующая на неё сила, соответственно. Уравнения молекулярной динамики решались с использованием схемы интегрирования Верле в скоростной форме:

$$\vec{x}_{n+1} = \vec{x}_n + \vec{v}_n \Delta t + \frac{1}{2} \frac{\vec{F}_n}{m} (\Delta t)^2,$$

$$\vec{v}_{n+1} = \vec{v}_n + (\vec{F}_n + \vec{F}_{n+1}) \frac{\Delta t}{2m},$$

где Δt – шаг интегрирования; индекс n – номер временного шага.

Обсуждены различные приближения к описанию взаимодействия, возникающему между пылевыми частицами, погруженными в плазму и характеристики сил, действующие на них. Взаимодействие между пылевыми частицами описывалось потенциалом Дебая-Хюккеля:

$$\varphi(r) = \frac{Z_d e}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right),$$

где r – расстояние между частицами; λ_D – параметр экранирования плазмы, а Z_d – заряд частицы. Заряд пылевых частиц рассчитывался в приближении ограниченного орбитального движения. Условия применимости приближения могут быть записаны в виде неравенства:

$$a \ll \lambda_D \ll l_{i(e)},$$

где a – радиус пылевой частицы; $l_{i(e)}$ – длина свободного пробега ионов (электронов). Приближение позволяет определить сечение поглощения электронов и ионов пылевой частицей. С помощью интегрирования сечения можно получить поток

частиц, падающих на пылевую частицу. Приравнивая выражения для потоков ионов и электронов, можно получить уравнение, содержащее заряд пылевых частиц и свойства окружающей их плазмы:

$$\exp(-z) = \frac{n_i}{n_e} \left(\frac{\mu}{\tau} \right)^{1/2} (1 + z\tau),$$

где параметры $z = \frac{Z_d e}{aT}$, $\tau = \frac{T_e}{T_i}$, $\mu = \frac{m_e}{m_i}$ выражены через температуру $T_{e(i)}$, массу $m_{e(i)}$ и концентрацию $n_{e(i)}$ электронов и ионов. В конце раздела приведены модели, использующиеся для описания потенциальных ловушек, удерживающих пылевые частицы от разлета.

Второй раздел посвящен изучению структур плазменно-пылевых кристаллов, содержащих различное число сортов пылевых частиц в удерживающих полях с различной конфигурацией и степенью анизотропии.

Для численного описания степени анизотропии удерживающего поля вводился безразмерный параметр ξ , определяемый как отношение коэффициента силы удерживающего поля в вертикальном направлении к коэффициенту силы удерживающего поля в горизонтальном направлении. Исследование проводилось применительно к системе пылевых частиц, имеющих следующие характеристики: диаметр 7,10 мкм, заряд 2660 е. Взаимодействие между частицами описывалось потенциалом Юкавы. Частицы удерживались от разлета гармоническим электростатическим потенциалом. Варьируя параметр ξ в пределах от 1 до 64, было проведено исследование влияния анизотропии на структуру плазменно-пылевого кристалла (рис. 1).

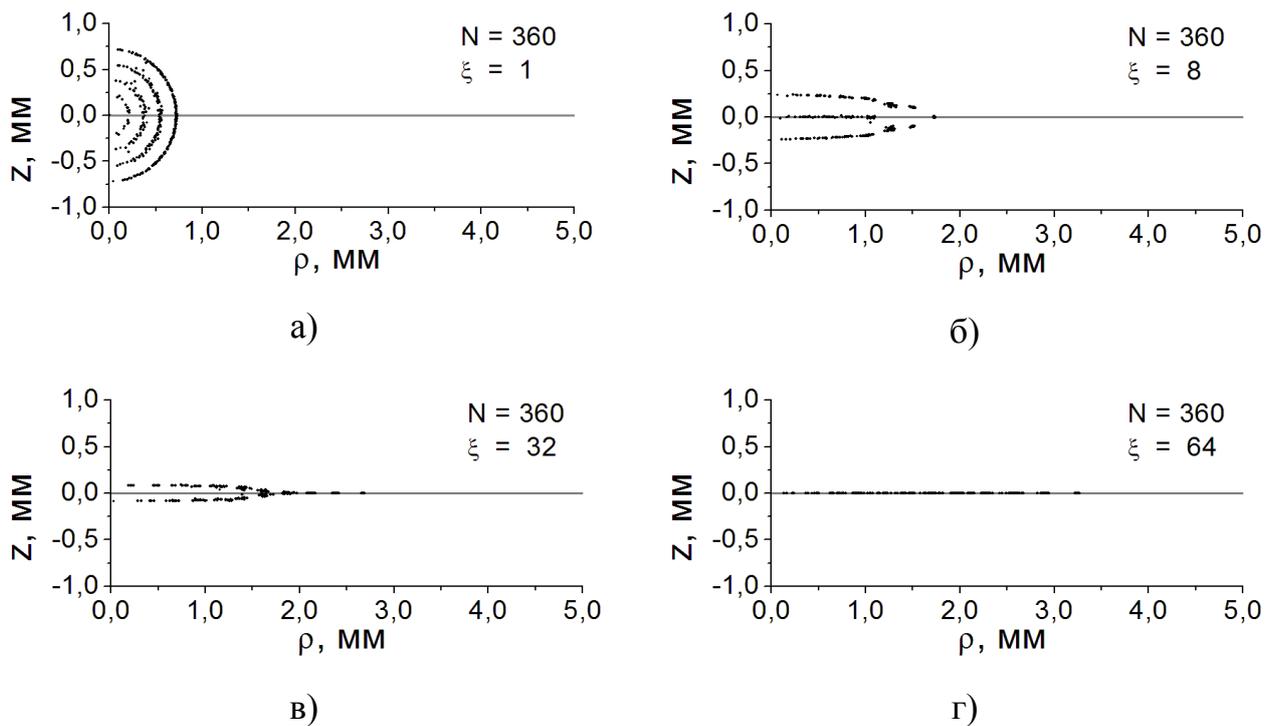


Рис. 1. Радиальное распределение пылевых частиц в проекции на плоскость $(\rho-z)$ цилиндрических координат для различных значений параметра анизотропии. N – число частиц

Как видно из рис. 1а, в изотропном удерживающем поле моделируемая система представляет собой кулоновский шар с характерной оболочечной структурой в кристаллическом состоянии. При увеличении значения параметра анизотропии ξ форма и структура моделируемой системы изменяются. Размеры кристалла увеличиваются в горизонтальном направлении и уменьшаются в вертикальном (рис. 1б – 1г). При достижении порогового значения параметра анизотропии структура моделируемого кристалла становится двумерной (рис. 1г). Расчеты показывают, что пороговое значение параметра ξ , при котором структура становится двумерной, зависит от числа пылевых частиц.

Как в изотропном, так и в анизотропном удерживающем поле число пылевых частиц в моделируемой системе оказывает существенное влияние на структуру плазменно-пылевого кристалла. При достаточно малом числе пылевых частиц моделируемый плазменно-пылевой кристалл в анизотропном удерживающем поле имеет двумерную структуру. При увеличении числа пылевых частиц структура моделируемого кристалла усложняется, в его центре формируются трехмерные оболочки. Пороговое значение числа пылевых частиц, при котором структура кристалла трансформируется из двумерной в трехмерную, зависит от величины безразмерного параметра ξ . Результаты моделирования структур плазменно-пылевых кристаллах с различным числом пылевых частиц, находящихся в анизотропном удерживающем поле со значением параметра $\xi = 32$, представлены на рис. 2.

Показано, что процесс формирования новых оболочек плазменно-пылевого кристалла при увеличении числа пылевых частиц в анизотропном случае отличается от аналогичного процесса в изотропном случае. Как и для кристалла, находящегося в изотропном удерживающем поле, зарождение новой оболочки при увеличении числа пылевых частиц начинается в центральной области. Однако в отличие от изотропного случая, в котором образующаяся оболочка имеет тенденцию к формированию сферически симметричной структуры, в анизотропном удержива-

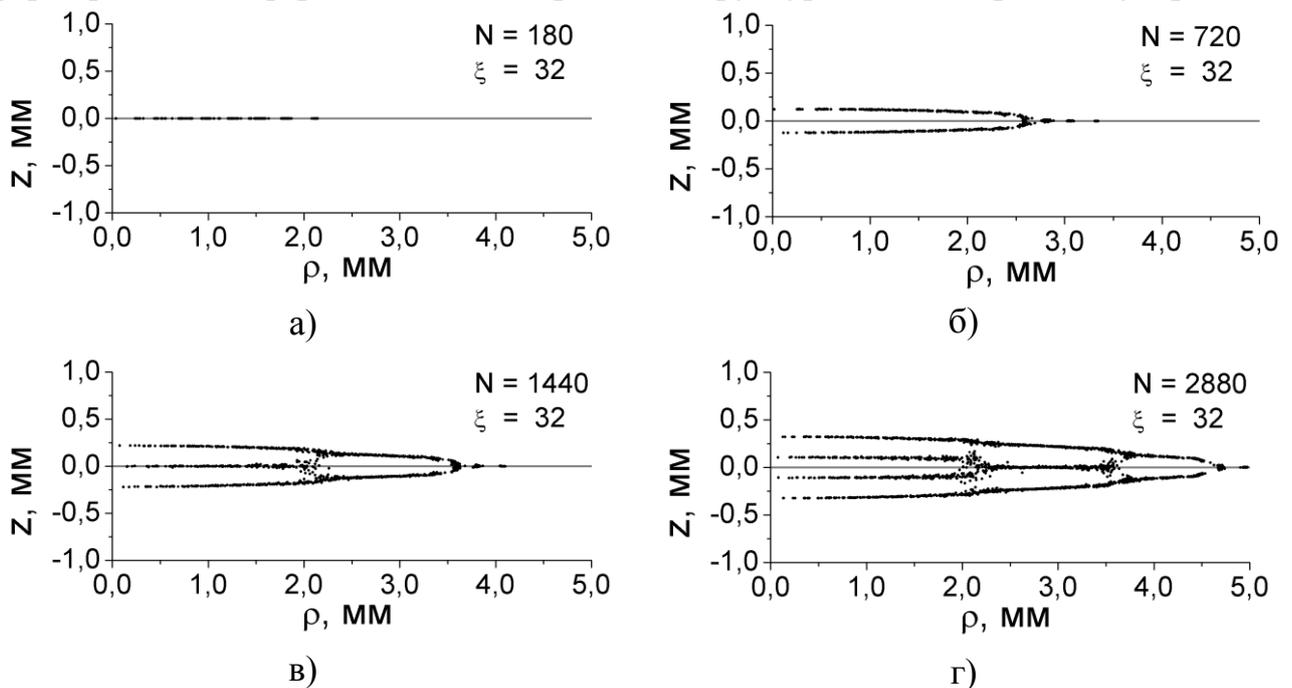


Рис. 2. Проекция структуры плазменно-пылевого кристалла на плоскость $(\rho-z)$ цилиндрических координат в анизотропном удерживающем поле для различного числа пылевых частиц (N)

ющем поле образующаяся оболочка имеет плоскую структуру. Кроме этого, оболочки плазменно-пылевого кристалла в сферически симметричном удерживающем поле не меняют своей формы при увеличении числа пылевых частиц на них – все пылевые частицы остаются на поверхности сферы. В анизотропном удерживающем поле изначально плоская внутренняя оболочка плазменно-пылевого кристалла начинает расщепляться с увеличением числа пылевых частиц.

Для удобства сравнения результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными, изучение структуры бикомпонентного плазменно-пылевого кристалла в сферически симметричном удерживающем поле проводилось для системы, состоящей из 190 пылевых частиц. Моделируемые пылевые частицы сферической формы удерживались от разлета изотропным гармоническим электростатическим потенциалом. Радиус и заряд пылевых частиц первого сорта составлял 1.7 мкм и 4700e, соответственно; второго сорта - 0.57 мкм и 1576e. Концентрация пылевых частиц второго сорта менялась от 0 до 100% с шагом в 10%.

Показано, что бинарная смесь заряженных частиц кристалла в изотропном поле имеет оболочечную структуру в кристаллическом состоянии. Обнаружено, что частицы с меньшим зарядом имеют тенденцию к формированию внешних оболочек, а частицы с большим зарядом – внутренних (рис. 3а). Следует отметить, что формируемые оболочки состоят из частиц только одного сорта. Показано, что зависимости изменения радиусов внешних оболочек от концентрации частиц второго сорта имеют примерно линейный характер (рис. 3б).

Проведено изучение структуры бикомпонентного плазменно-пылевого кристалла в лабораторных условиях с учетом действия в вертикальном направлении термофоретической силы и силы тяжести. Число частиц каждого сорта составляло 95. В горизонтальном направлении действовала только электростатическая сила. Результирующая сила, действующая на пылевые частицы разного размера в вертикальном направлении, представлена на рис. 4.

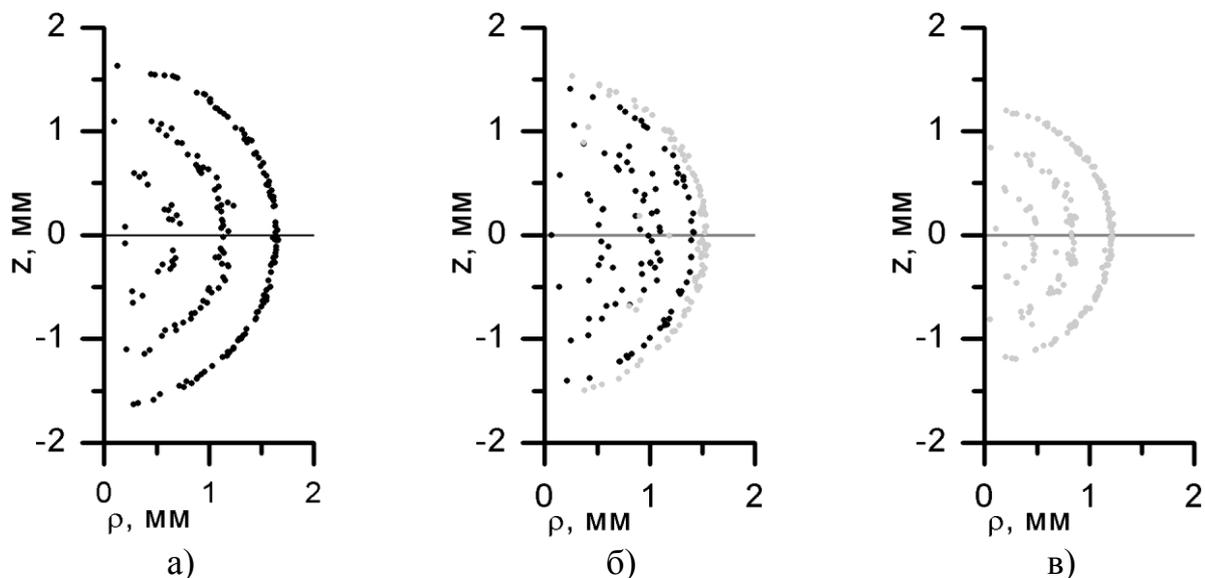


Рис. 3. Радиальное распределение пылевых частиц в проекции на плоскость $(\rho-z)$ цилиндрических координат для: а) кулоновский шар из частиц первого сорта; б) кулоновский шар, в котором 50% составляют частицы второго сорта; в) кулоновский шар из частиц второго сорта. Серому цвету соответствуют частицы зарядом 1576e, черному – 4700e

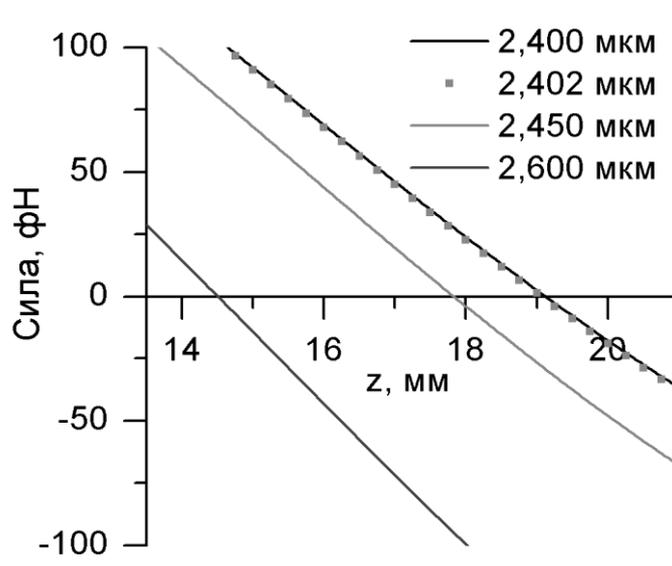


Рис. 4. Зависимость результирующей силы от высоты (z) для частиц различного размера

Результаты расчетов показали, что при такой конфигурации удерживающего поля частицы разных сортов будут сегрегированы в вертикальном направлении. Если размеры частиц отличаются достаточно сильно, то результирующая сила приведет к тому, что на разных высотах образуются два слабо взаимодействующих между собой кулоновских шара (рис. 5а). Уменьшение разницы между размерами пылевых частиц ведет к сближению кулоновских шаров и деформированию их оболочек (рис. 5б). В предельном случае происходит формирование единого кулоновского шара с общими оболочками (рис. 5в)

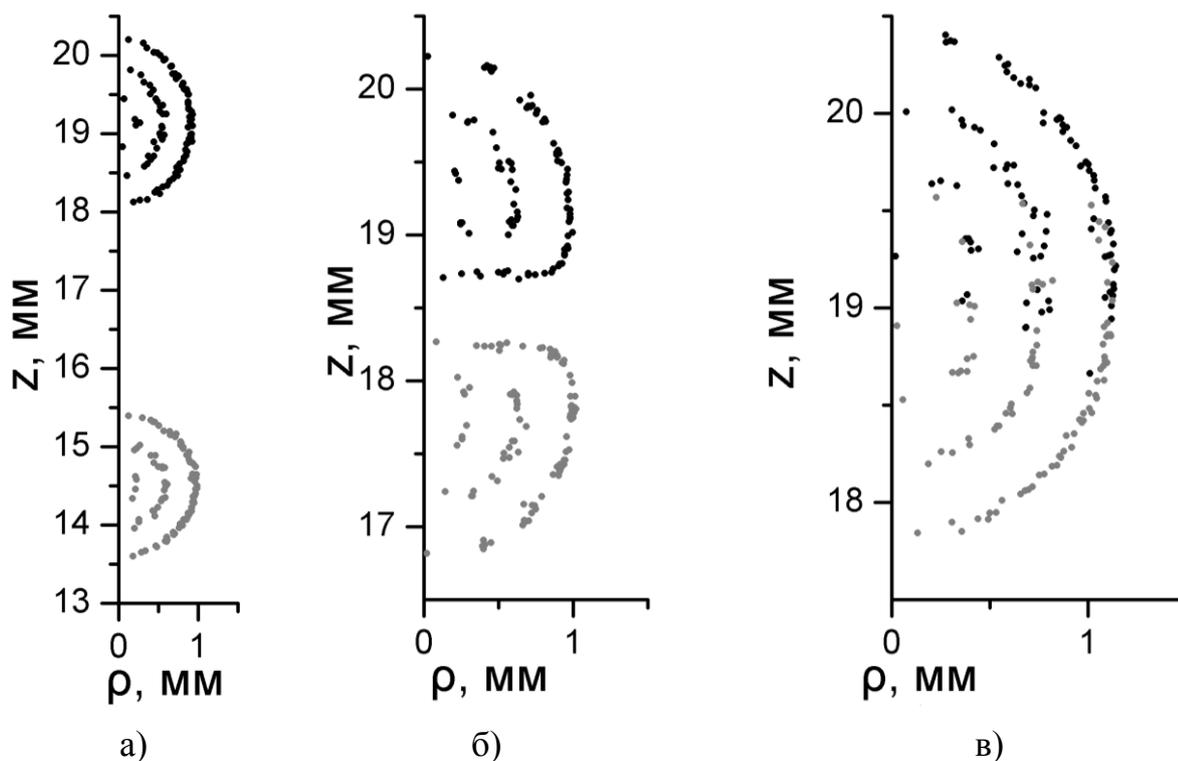


Рис. 5. Радиальное распределение пылевых частиц разного размера в проекции на плоскость (ρ - z) цилиндрических координат. Черным цветом выделены частицы первого сорта, серым – второго. Радиус частиц первого сорта 2,4 мкм, радиус частицы второго сорта: а) 2,6 мкм; б) 2,45 мкм; в) 2,402 мкм

Исследование влияния степени анизотропии удерживающего поля на структуру основного состояния проводилось применительно к плазменно-пылевому кристаллу, состоящему из 360 пылевых частиц двух сортов. Из них 180 частиц имели радиус 2.3 мкм и заряд 1955 е, а размер и заряд остальных 180 частиц варьировались и принимали значения, указанные в таблице 1.

Таблица 1. Размеры и заряды пылевых частиц второго сорта

г, мкм	Q, е
2.32	1966
2.35	1984
2.40	2013
2.50	2072

Как и в случае однокомпонентного кристалла, структура бикомпонентного плазменно-пылевого кристалла существенным образом зависит от степени анизотропии удерживающего поля. Однако, бикомпонентные структуры имеют ряд особенностей, представленных на рис. 6.

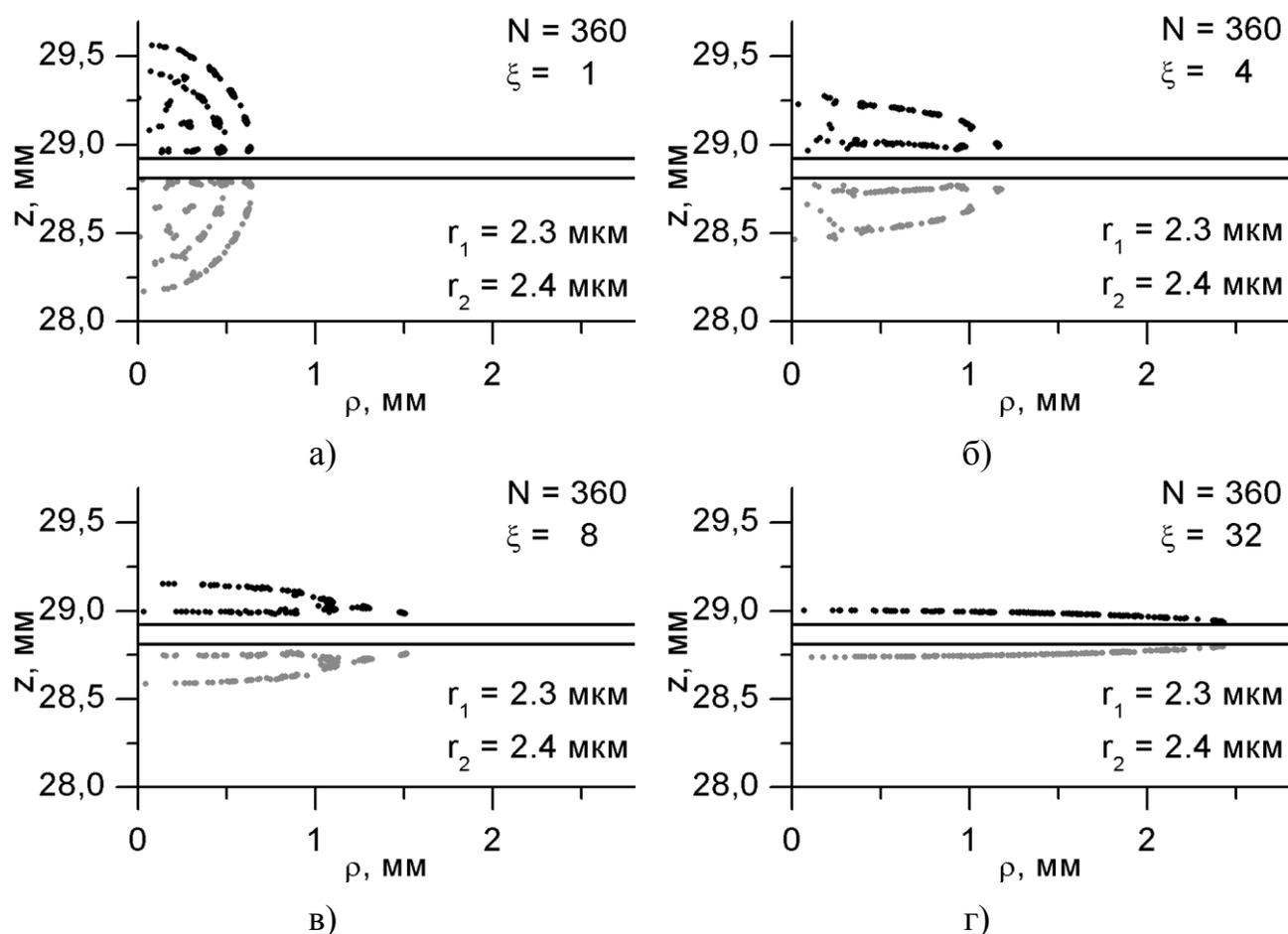


Рис. 6. Радиальное распределение пылевых частиц бикомпонентного плазменно-пылевого кристалла в проекции на плоскость ρ - z цилиндрических координат для различных значений параметра анизотропии ξ . Горизонтальными линиями обозначены равновесные высоты для частиц соответствующего сорта

Из рисунка видно, что:

- частицы разных сортов сегрегируют по высоте вследствие различия в заряде и массе.
- области, занятые частицами разных сортов, разделены «запрещенной зоной», свободной от пылевых частиц обоих сортов.

Ширина «запрещенной зоны» зависит от разницы между размерами частиц разных сортов.

Как и для однокомпонентного плазменно-пылевого кристалла, изменение степени анизотропии удерживающего поля ведёт к изменению структуры кристалла в кристаллическом состоянии и изменению числа оболочек. При увеличении степени анизотропии число оболочек плазменно-пылевого кристалла уменьшается. Структуры, формируемые каждым из сортов пылевых частиц, аналогичны структурам однокомпонентного плазменно-пылевого кристалла (рис. 1, рис. 6).

Третий раздел связан с изучением поведения плазменно-пылевых систем при импульсных внешних воздействиях. Рассмотрено поведение плазменно-пылевых систем при механическом воздействии, скачкообразном изменении внешнего удерживающего поля и воздействии наносекундными электрическими импульсами.

Результаты расчетов показали, что при импульсном всестороннем сжатии внешней оболочки в кулоновском шаре формируются сходящиеся сферические волны. Такое нагружение приводит к колебанию оболочек кулоновского шара, которое характеризуется биениями. Биения связаны с тем фактом, что собственные частоты колебания оболочек близки по величине. В течение нескольких десятков периодов колебаний биения значительно ослабевают, энергия колебаний переходит в тепловую энергию.

Период колебаний оболочек (T) зависит от размера кулоновского шара (количества пылевых частиц в моделируемой системе - N). Анализ расчетов показал, что эта зависимость носит экспоненциальный характер:

$$T \approx 0.06 + 0.006 \times e^{-N/2000}.$$

Наряду с изучением поведения кулоновского шара при импульсном всестороннем нагружении, исследовано распространение возмущений в протяженных плазменно-пылевых кристаллах при одноосном импульсном нагружении. Для этого было проведено моделирование протяженного однокомпонентного плазменно-пылевого кристалла, находящего в цилиндрическом удерживающем поле электростатической природы. Пылевые частицы сферической формы имели радиус 1.7 мкм, заряд 1576 е. Общее количество пылевых частиц в кристалле составляло 20 000. В одном из направлений для моделирования граничных условий использовались абсолютно жесткие механические стенки. В указанных условиях изучаемая система принимала форму цилиндра (рис. 7). Из рис. 7б видно, что в кристаллическом состоянии плазменно-пылевая система имеет оболочечное строение.

Для инициирования механического импульсного нагружения левый край моделируемого плазменно-пылевого кристалла (рис. 7а) смещался с постоянной скоростью. Сгенерированные таким образом возмущения распространялись в исследуемом кристалле вдоль оси X и представляли собой волны сжатия и разрежения. Распределение скоростей пылевых частиц в моделируемом кристалле вдоль направления X (рис. 7а) в различные моменты времени приведено на рис. 8. Хорошо видно,

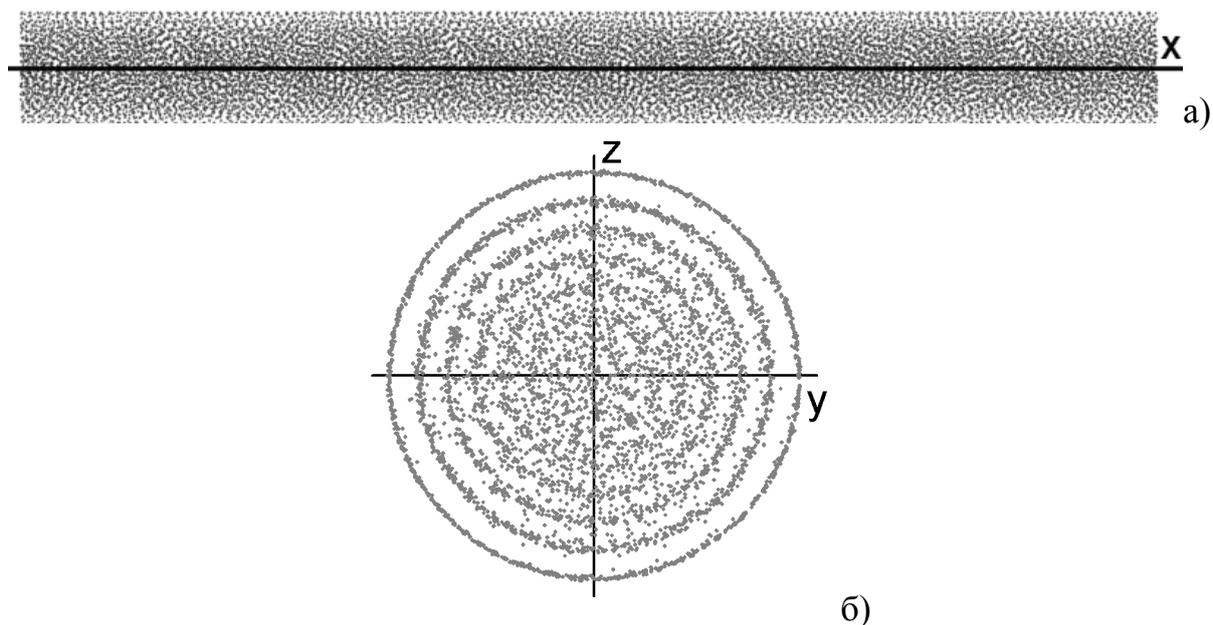


Рис. 7. Проекция структуры моделируемого плазменно-пылевого кристалла на плоскость: а) x - z ; б) y - z

что впереди распространяется волна сжатия, за ней идет волна разрежения. Скорость распространения волн составляла примерно 7 см/с. Амплитуда сформированной волны сжатия уменьшается со временем, а сама волна расширяется. В то же время амплитуда волны разгрузки, которая идет вслед за волной сжатия, увеличивается. Расчеты показали, что распространение возмущений, инициированных перемещением захвата, не привело к нарушению оболочечной структуры. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными.

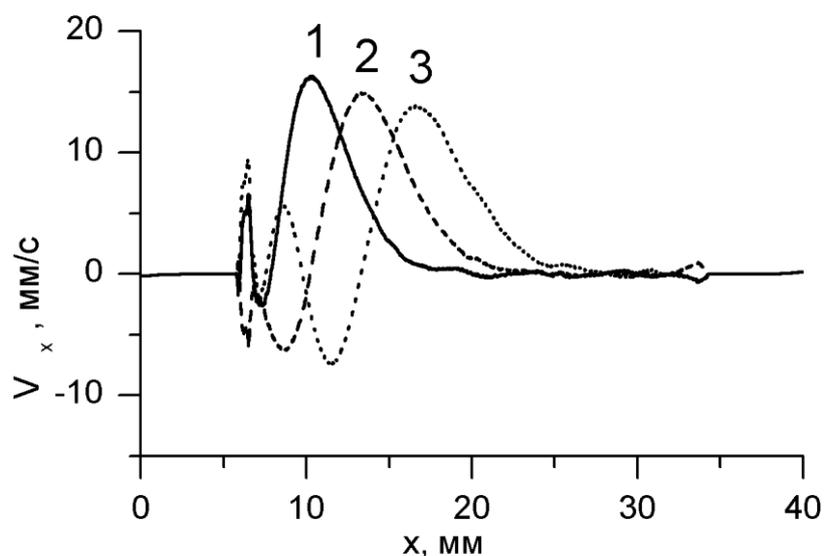


Рис. 8. Распределение скоростей пылевых частиц вдоль направления нагружения после перемещения левого захвата на 0.1 мм с постоянной скоростью 4 мм/с в моменты времени: 1 - 0.10 с; 2 - 0.15 с; 3 - 0.20 с

Исследован отклик системы плазменно-пылевых частиц на скачкообразное изменение конфигурации удерживающего поля. Изучено два варианта нагружения: в первом варианте задавалось сферически симметричное изменение удерживающего поля, во втором - анизотропное изменение удерживающего поля. Изучение отклика кулоновского шара проводилось на основе анализа положения пылевых частиц, расположенных на внешних оболочках.

Изучение влияния сферически симметричного импульсного нагружения проводилось применительно к плазменно-пылевой системе, состоящей из 2000 пылевых частиц сферической формы диаметром 3,4 мкм. Пылевые частицы удерживались от разлета сферически симметричным удерживающим полем. Такое нагружение вызывало колебания оболочек, сопровождающиеся изменением объема кулоновского шара, однако его форма не изменялась (рис. 9). При данном способе нагружения оболочки первоначально колебались практически синхронно, со временем перераспределяя упорядоченное движение в тепловое. Частота колебаний оболочек зависела от конечного значения силы удерживающего поля.

Исследование влияния анизотропного изменения удерживающего поля проводилось применительно к плазменно-пылевому кристаллу, состоящему из 180 пылевых частиц. Пылевые частицы удерживались ловушкой, имитирующей действие электростатической, термофоретической и гравитационной сил. Для генерации колебаний величина поля, удерживающего пылевые частицы от разлета в горизонтальном направлении, скачкообразно увеличивалась. При таком способе нагружения колебания оболочек кулоновского шара носили сложный характер, обусловленный сложением двух гармонических колебательных мод. Одна из них связана с изменением формы без изменения объема, другая - с изменением объема без изменения формы.

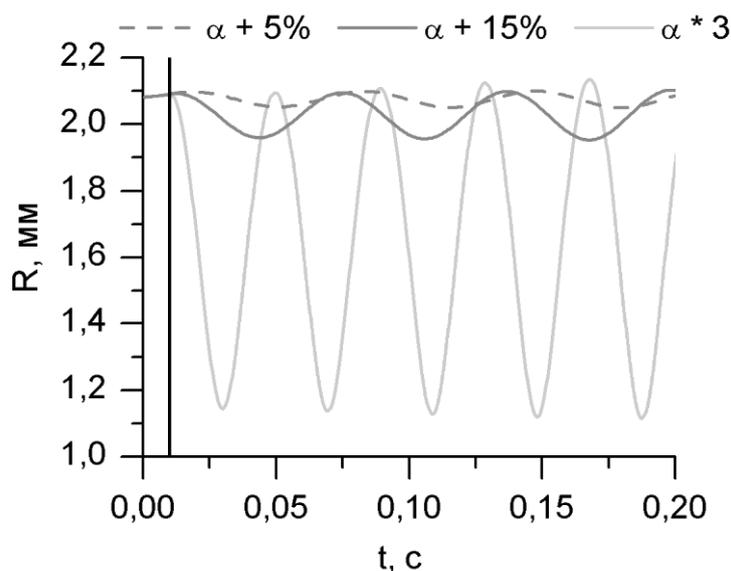


Рис. 9. Колебания внешней оболочки кулоновского шара из 2000 частиц при скачкообразном увеличении удерживающей силы. Вертикальной чертой обозначен момент изменения электрического поля. α – коэффициент, определяющий силу удерживающего поля

Проводилось моделирование поведения плазменно-пылевого кристалла при воздействии на него наносекундными электрическими импульсами. Для удобства сравнения с экспериментальными данными рассматривался плазменно-пылевой кристалл, состоящий из 14 пылевых частиц (рис. 10).

Также, как и в эксперименте, пылевые частицы имели сферическую форму и обладали плотностью меламин-формальдегида. Радиус пылевых частиц составлял 3,585 мкм, заряд – 2660 е.

Для описания изменения заряда пылевых частиц после воздействия на плазменно-пылевой кристалл наносекундным электрическим импульсом была предложена феноменологическая схема: в течение 0.05 мс после наносекундного импульса происходило линейное нарастание заряда в 1.3 раза от начальной величины, затем в течение 0.15 мс заряд пылевой частицы уменьшался по экспоненциальному закону.

Такая схема изменения заряда пылевой частицы задавалась из предположений, что она будет качественно соответствовать экспериментальной зависимости временной эволюции напряжения на rf-электроре после воздействия электрическим наносекундным импульсом.

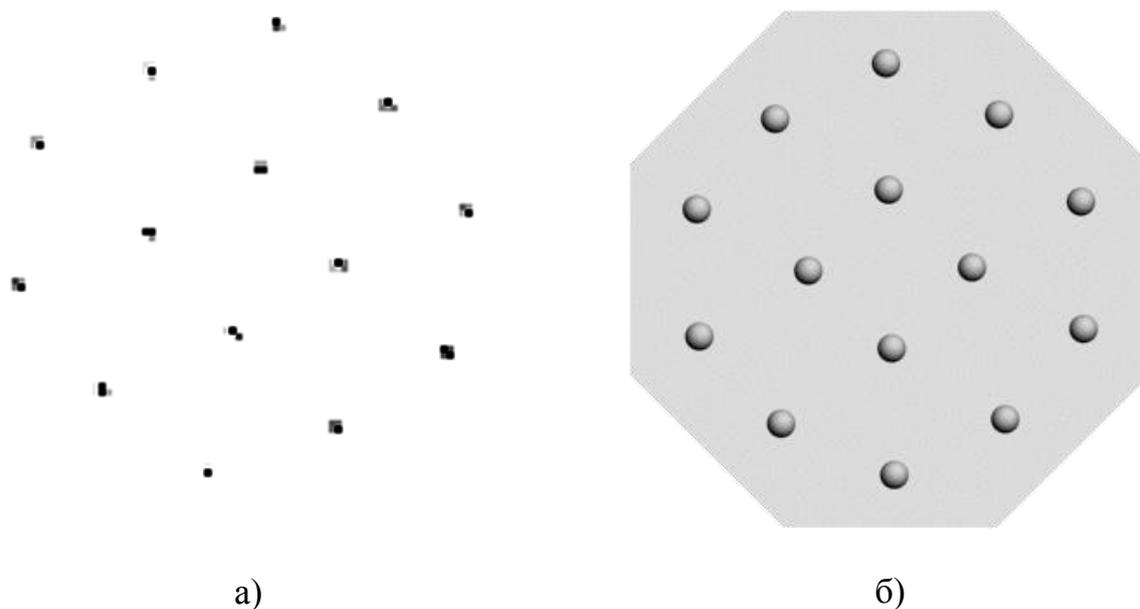


Рис. 10. Структура плазменно-пылевого кристалла из 14 пылевых частиц (вид сверху). Эксперимент (а), модель (б)

Результаты расчетов показали, что амплитуда и характер колебаний плазменно-пылевого кристалла существенным образом зависят от коэффициента силы трения, действующей на пылевые частицы со стороны окружающей среды, и частоты импульсного воздействия. В случае, когда сила трения не учитывалась, колебания пылевых частиц вблизи резонансной частоты имели характер биений, а во всех остальных случаях колебания частиц достигали максимума, определяемого частотой импульсов и величиной силы трения окружающей среды (рис. 11).

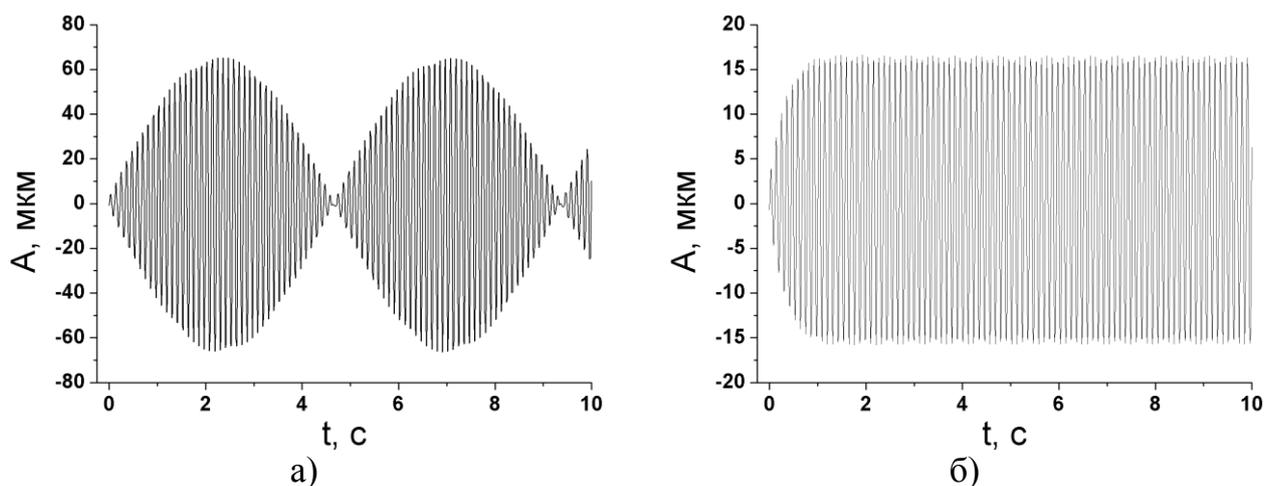


Рис. 11. Зависимость положения центра масс плазменно-пылевого кристалла (A) в вертикальном направлении от времени при импульсном электрическом воздействии. Частота воздействия – 8.9 Гц. а) без учета трения; б) с учетом трения

По результатам расчетов были построены амплитудно-частотные характеристики моделируемого плазменно-пылевого кристалла (рис. 12), которые находятся в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными. Проведенное исследование показало, что сила трения окружающей среды существенно влияет не только на амплитуду колебаний пылевых частиц, но и на положение пика на амплитудно-частотной характеристике изучаемой системы. Отмечено, что анализ амплитудно-частотных характеристик позволяет оценить динамику и величину изменения заряда пылевых частиц при наносекундных электрических импульсах.

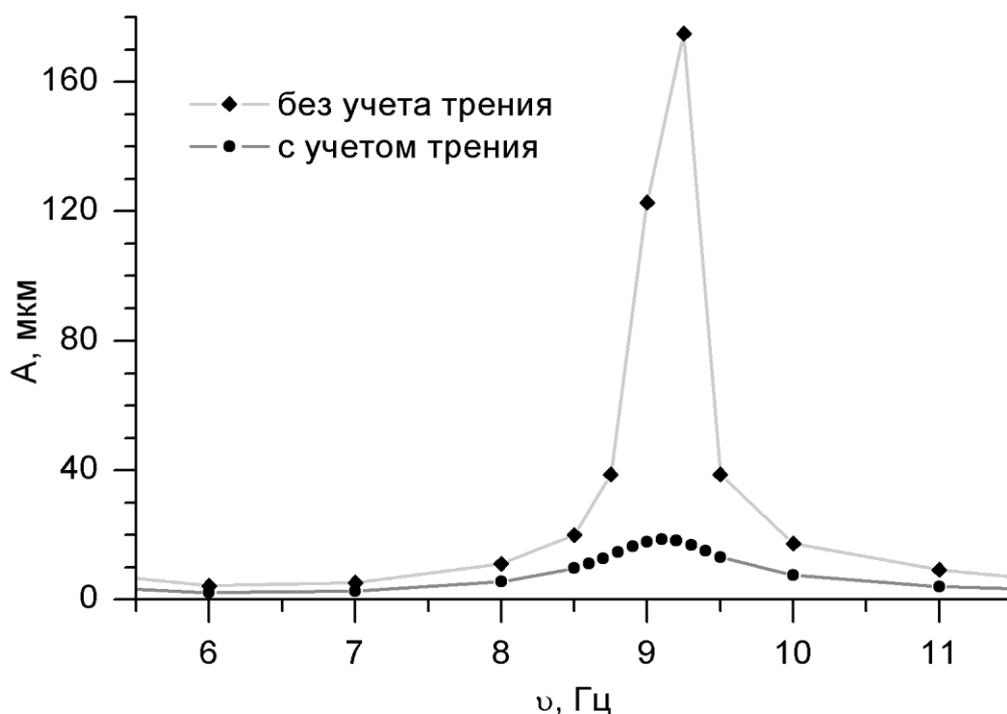


Рис. 12. Амплитудно-частотные характеристики моделируемого кристалла

Основные результаты и выводы:

1. Показано, что форма, размеры и структура (число и заселенность оболочек) плазменно-пылевого кристалла существенно зависят от степени анизотропии ловушки, удерживающей пылевые частицы от разлета.
2. Существует пороговое значение параметра анизотропии, при котором структура моделируемого кристалла меняется качественно, трансформируясь из трехмерной в плоскую. Количество пылевых частиц существенно влияет на заселенность и число оболочек плазменно-пылевого кристалла в удерживающих полях любой конфигурации.
3. Для сферически симметричного удерживающего поля бикомпонентный плазменно-пылевой кристалл имеет оболочечную структуру в основном состоянии. При этом каждая оболочка содержит частицы только одного сорта.
4. Показано, что, изменяя параметры пылевых частиц, можно управлять структурой плазмы с конденсированной дисперсной фазой. Для бинарной системы в лабораторных условиях можно формировать: а) два кулоновских слабо взаимодействующих шара; б) два сильно взаимодействующих кулоновских шара с деформированными оболочками; в) один кулоновский шар, в котором пылевые частицы одного из сортов будут сегрегированы либо в экваториальной части, либо в нижней (верхней) части кулоновского шара.
5. Показано, что импульсное изменение силы внешнего удерживающего поля приводит к колебаниям кулоновского шара. Частота колебаний определяется конечным значением силы удерживающего поля. В случае сферически симметричного изменения удерживающего поля колебания сопровождаются гармоническим изменением объема кулоновского шара. В случае анизотропного изменения внешнего удерживающего поля колебания оболочек кулоновского шара могут быть описаны двумя колебательными модами. Одна из них связана с изменением формы, вторая – изменением объема.
6. Амплитуда колебаний плазменно-пылевого кристалла линейно зависит от величины изменения заряда при воздействии наносекундными электрическими импульсами. Рассчитанные амплитудно-частотные характеристики плазменно-пылевого кристалла позволяют оценить динамику и величину изменения заряда пылевых частиц.

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Psakhie S.G., Zolnikov K.P., Skorentsev L.F., Kryzhevich D.S., Abdrashitov A.V. Structural features of bicomponent dust Coulomb balls formed by the superposition of fields of different origin in plasma // *Phys. plasmas*. 2008. V.15. P. 053701 (5 pages)
2. Псахье С.Г., Зольников К.П., Скоренцев Л.Ф., Крыжевич Д.С., Абдрашитов А.В. Особенности строения бикомпонентных плазменно-пылевых кулоновских шаров // *ПЖТФ*. 2008. Т.34. С. 6–12.
3. Псахье С.Г., Зольников К.П., Абдрашитов А.В. Исследование отклика кулоновского шара заряженных пылевых частиц на внешние воздействия // *ПЖТФ*. 2009. Т.35. С. 46–52.
4. Псахье С.Г., Зольников К.П., Абдрашитов А.В. Влияние анизотропии удерживающего поля на структуру плазменно-пылевого кластера // *ПЖТФ*. 2010. Т.36. С. 76–82.
5. Псахье С.Г., Зольников К.П., Абдрашитов А.В. О формировании состояний в пылевой плазме // *Физическая мезомеханика*. 2010. Т.13. № 5. С. 75–83.

В других научных изданиях

6. Abdrashitov A.V, Zolnikov K.P., Psakhie S.G. Charged dust particles system response on impulse loading // *Proceedings of the XXXVI Summer School Advanced Problems in mechanics* St. Petersburg. July 6 – July 10. 2008. RAS. St. Petersburg, 2008. P.1–7.
7. Abdrashitov A.V, Zolnikov K.P., Psakhie S.G. Spherical and cylindrical charged dusty particle system response on pulse loading // *Proceedings of the XXXVII Summer School Advanced Problems in Mechanics* Repino, St. Petersburg. June 30 – July 5. 2009. RAS. St. Petersburg. 2009. P. 12–18.
8. Abdrashitov A.V., Zolnikov K.P., Psakhie S.G. Behavior of charged dusty particle systems of spherical and cylindrical symmetry under pulse loading // *Physics of Extreme states of Matter -2009*. Inst. of Problems of Chemical Physics RAS. Edited by Fortov V.E. et al. Chernogolovka. 2009. P. 231–234.
9. Abdrashitov A.V, Zolnikov K.P., Psakhie S.G. Simulation of dusty plasma shape and structure in ground state at deferent configuration of confinement // *Proceedings of the XXXVIII Summer School Advanced Problems in Mechanics* Repino, St. Petersburg. July 1 – 5. 2010. RAS. St. Petersburg. 2010. P.12–16.
10. Abdrashitov A.V., Zolnikov K.P., Psakhie S.G. Simulation of dusty plasma ground state in anisotropic confinement field // *Europhysics Conference: 37th EPS Conference on Plasma Physics*. Vol. 34A. 2010. Dublin. Ireland. 21-25 June. 2010. P5.324 (4 pages)
11. Abdrashitov A.V., Zolnikov K.P., Psakhie S.G. Structure of dusty plasma clusters in confinement field of different configuration // *16th International Symposium on High Current Electronics*. Tomsk. Russia. 19-24 September 2010 / *Proceedings*. Edited by B. Kovalchuk and G. Remnev. P.246–248.
12. Abdrashitov A.V., Zolnikov K.P., Psakhie S.G. Behavior of dust plasma clusters under electric pulsed loading // *IIEFM – 2011*. Book of Abstracts. Institute of Problems of Chemical Physics RAS. Edited by Fortov V.E. et al. Chernogolovka. 2011. P. 174–175.