

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ ГЕЛИЯ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 5–300 К

И. С. Самойлов^a, В. П. Баев^a, А. В. Тимофеев^{a,c}, Р. Х. Амиров^a,
А. В. Кириллин^a, В. С. Николаев^{a,b}, З. В. Бедрань^{a,b}*

^a *Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
125412, Москва, Россия*

^b *Московский физико-технический институт (государственный университет)
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

^c *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
123458, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 7 сентября 2016 г.

Экспериментально исследованы плазменно-пылевые структуры в тлеющем разряде гелия в диапазоне температур 5–300 К. Описана экспериментальная установка, предоставляющая возможность непрерывного изменения температурного режима. Представлена методика обработки экспериментальных данных. Проведено измерение межчастичных расстояний в диапазоне температур 9–295 К и их сравнение с величиной радиуса Дебая. Указаны диапазоны параметров эксперимента, при которых формируются плазменно-пылевые структуры и проявляются различные формы их поведения (вращение, колебания структур, образование вертикальных линейных цепочек и т. д.). Обсуждается применимость потенциала Юкавы к описанию структурных свойств пылевой плазмы в условиях эксперимента.

DOI: 10.7868/S0044451017030130

1. ВВЕДЕНИЕ

Пылевая плазма представляет собой полностью или частично ионизованный газ, содержащий частицы конденсированного вещества микронных или субмикронных размеров. Вследствие разной подвижности электронов и ионов пылевые частицы приобретают большой электрический заряд (до значений порядка $10^4 e$) и образуют новую заряженную компоненту плазмы. Величина заряда, его флуктуации, специфика межчастичных взаимодействий приводят к возникновению уникальных свойств данной системы.

Лабораторные исследования пылевой плазмы ведутся с середины XX века [1–9]. Актуальность ее изучения обусловлена как индустриальными приложениями (производство элементов микроэлектроники, технологии напыления материалов) [10, 11], так и теоретическими изысканиями (она встречается повсеместно в космосе, в ионосфере Земли, в плазмен-

ных установках и т. д.) [12–14]. Основными способами ее получения в условиях земной гравитации являются ВЧ-разряд и тлеющий разряд постоянного тока.

В типичном лабораторном эксперименте с тлеющим разрядом постоянного тока [15–18] разряд создается в вертикальной цилиндрической трубке. Упорядоченные структуры пылевых частиц наблюдаются в стоячих стратах положительного столба, где силы, действующие на пылевые частицы, сбалансированы. Страты представляют собой пространственную периодичность параметров плазмы с характерным масштабом порядка нескольких сантиметров [19]. В голове страты возникает вертикальное электрическое поле достаточной величины (10–15 В/см) и степени неоднородности, чтобы тяжелые заряженные пылевые частицы левитировали. Вследствие явления амбиполярной диффузии, высокого плавающего потенциала стенок разрядной трубки и термофореза в голове страты также имеется горизонтальная электростатическая ловушка, удерживающая пылевые частицы от разлета и ухода на стенки.

* E-mail: timofeevalv1@gmail.com

Инжектированные в плазму пылевые частицы сначала проскакивают свое положение равновесия, затем релаксируют в течение нескольких секунд и выстраиваются в определенную структуру [17]. Тип структуры определяется параметрами разряда, количеством частиц и их характеристиками [20]. В широком диапазоне параметров при высокой плотности пылевых частиц образуются квазикристаллические структуры с выраженным дальним порядком, однако при повышении тока или уменьшении давления происходит «плавление» структуры и переход к ближнему порядку. В нескольких экспериментах [21, 22] также замечено, что с ростом тока длина структур уменьшается, увеличивается их диаметр, частицы смещаются к периферии, в центре структуры образуется полость.

Охлаждение плазменно-пылевой системы до криогенных температур приводит к уменьшению расстояний между частицами, соответственно, к увеличению плотности пылевого образования и степени неидеальности системы [23]. Значительную роль начинают играть метастабильные атомы и молекулы и связанные с ними процессы ионизации [23].

В экспериментах [24, 25] были впервые получены устойчивые структуры при температурах жидкого азота и жидкого гелия. Однако используемые в подобных экспериментах установки не позволяли работать в режиме непрерывного контролируемого изменения температуры, а также детально изучать структуры в области низких температур в связи с их высокой плотностью и сложностью наблюдения.

В данной работе эти проблемы решены. Прототипом послужила установка, описанная в монографии [26], на которой было обнаружено существование двух разных состояний криогенной плазмы, влияющих на ВАХ тлеющего разряда, определен коэффициент поверхностного натяжения пылевых структур при 77 К, обнаружены «сверхплотная сфера» [26] и колеблющаяся сфера [20], образующиеся вблизи 5 К. По сравнению с использовавшейся установкой была усовершенствована система охлаждения с возможностью непрерывного контролируемого изменения температуры, улучшена система наблюдения, автоматизирована и синхронизована запись всех экспериментальных данных.

Диапазон изменения температуры составил от 5 К до 300 К. Получены экспериментальные зависимости межчастичных расстояний от параметров разряда (напряжения и тока разряда, температуры стенки, плотности среды). На основе анализа полученных зависимостей обсуждается вопрос о при-

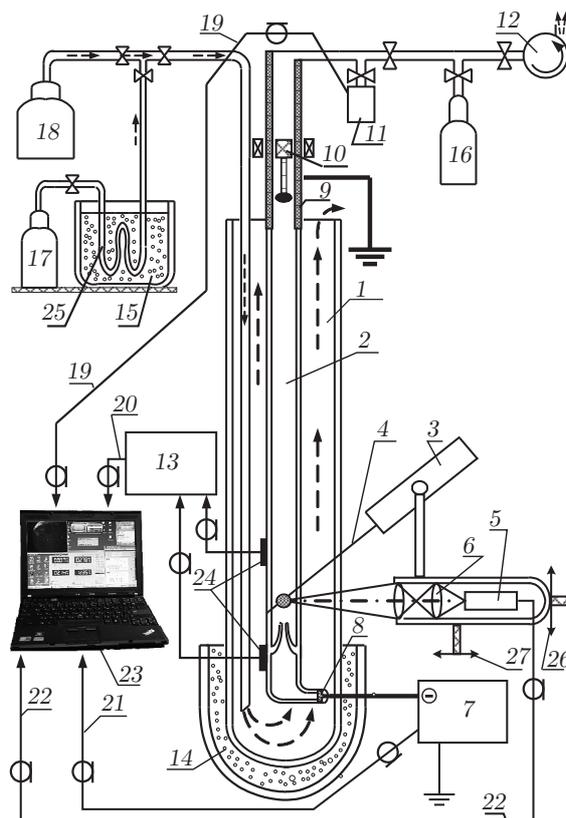


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 — криостат, 2 — разрядная трубка, 3 — лазер, 4 — луч лазерного ножа, 5 — видеокамера, 6 — микроскоп, 7 — источник питания тлеющего разряда, 8 — катод разрядной трубки, 9 — анод разрядной трубки, 10 — инжектор пыли, 11 — баратрон, 12 — вакуумный насос, 13 — многоканальный регистратор PCS10-804, 14, 15 — емкости с жидким азотом, 16, 17 — баллоны с газообразным гелием, 18 — дьюар с жидким гелием, 19 — канал регистрации давления, 20 — канал регистрации температуры стенки, 21 — канал регистрации напряжения и тока разряда, 22 — канал регистрации видео, 23 — компьютер, 24 — температурные датчики, 25 — теплообменник, 26 — сканирование фокусом по длине трубки, 27 — сканирование фокусом по сечению трубки

менимости потенциала Юкавы к описанию межчастичных взаимодействий. Проведено сравнение состояний с дебаевской длиной и размером частиц. Получены формулы, описывающие зависимость межчастичного расстояния от температуры. Определены условия (температура и плотность газа, напряжение и ток разряда), при которых формируются различные виды структур и проявляются различные формы их поведения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Разрядная трубка 2 представляет собой

расположенный вертикально кварцевый цилиндр с внутренним диаметром 16 мм и расстоянием между электродами 50 см. Катод 8 находится в нижней части трубки в охлаждаемой зоне. Анод 9, расположенный в верхней части трубки, выполнен из тонкостенной трубки из нержавеющей стали и припаян через коваровое кольцо к кварцевой разрядной трубке 2. Вводимые в плазму частицы находятся в металлическом контейнере 10 в верхней части газоразрядного устройства внутри заземленного анода 9, который одновременно является узлом механического крепления трубки на капке криостата. Данная конструкция газоразрядного устройства обеспечивает высокую механическую прочность и жесткость, а также малую величину деформации при изменении температуры в интервале 4.2–300 К, и при этом несложными манипуляциями позволяет осуществлять осевое и радиальное изменения положения и корректировку рабочей зоны трубки во время эксперимента. При встряхивании контейнера с помощью электромагнита частицы пыли из контейнера инжектируются в трубку и, падая вниз, попадают в область разрядной плазмы.

Для генерации неоднородности поля при криогенных температурах вблизи 4.2 К в нижней части трубки расположен капилляр, имеющий сужение около 1 мм, что позволяет наблюдать пылевые структуры при температуре жидкого гелия в условиях полного вымерзания посторонних примесей в разряде в гелии.

Контроль температуры осуществлялся при помощи температурных датчиков 24 (откалиброванные терморезисторы ТВО-0.125), установленных на внешнюю поверхность стенки трубки вблизи области формирования плазменно-пылевых структур. Термосигналы с датчиков регистрировались многоканальным регистратором 13 PCS10-804. Давление газа в разрядной трубке измерялось баратроном 11 в теплой зоне газовакуумной системы, находящейся при комнатной температуре. Плазменно-пылевые объекты в разряде регистрировались цифровой камерой 5 с разрешением 720×576 пкс и скоростью записи 30 кадр./с. В качестве объектива использовался один из окуляров бинокулярного микроскопа 6 со ступенчатым калиброванным переключением увеличения, что позволяло проводить геометрические измерения регистрируемых объектов непосредственно на мониторе. В экспериментах применялись частицы из полидисперсной алмазной пыли. Визуализация пылевых образований осуществлялась при подсветке плоским лучом 4 полупроводникового зеленого лазера 3 толщиной около 0.1 мм

и мощностью излучения до 5 мВт. Плоскость лазерного ножа составляла 45° относительно оси трубки и пересечение ее с осью наблюдения всегда находилось в фокусе видеорегирующей аппаратуры. Оптическая схема регистрации настроена так, что при ступенчатом изменении фиксированного увеличения в интервале (10–100) обладает большой глубиной резкости, и при увеличении равном 20 составляет порядка 1 мм. Такой способ регистрации объемных плазменно-пылевых объектов позволяет одновременно наблюдать фрагменты всех сечений осесимметричных образований на одном изображении. Видеокамера и жестко связанный с ней подсвечивающий лазер имели возможность контролируемого перемещения вдоль разрядной трубки и поперек ее. При продольном и поперечном сканировании видеорегирутором это позволяло получить полную информацию о пространственных и структурных характеристиках плазменно-пылевых образований.

Во время эксперимента все измерения одновременно выводились на монитор 23, а именно: видеоизображение пылевых образований с калиброванным увеличением объекта (22), данные о распределении температуры по длине разрядной трубки с двух датчиков в охлаждаемой зоне (20), величины тока и напряжения разряда (21), данные о давлении среды в разрядной трубке в «горячей зоне», находящейся при комнатной температуре (19). Измеренное давление приводилось к плотности газа в разряде, соответствующей измеряемой температуре стенки в охлаждаемой зоне. Электронные таблицы всех регистрируемых и записываемых параметров синхронизованы. Кроме того, изображение монитора со всеми данными и оперативными голосовыми комментариями записывалось в видеофайл. Видеоизображение пылевых структур дополнительно записывалось в отдельный синхронный видеофайл с разрешением 720×576 пкс, 30 кадр./с.

Во время эксперимента параметры менялись в диапазонах: ток разряда 0.06–2.5 мА, напряжение разряда 0.04–2.5 кВ, плотность гелия в охлаждаемой зоне $(2-35) \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, температура стенки разрядной трубки 5.5–300 К.

Экспериментальный стенд обладает возможностью непрерывного контролируемого изменения температурного режима криостата. Для проведения экспериментов криостат предварительно продувался газообразным гелием из баллона 17 при комнатной температуре с целью вытеснения из криостата воздуха, содержащего значительное количество водяных паров. Затем гелий, поступающий из баллона 17, охлаждался теплообменником

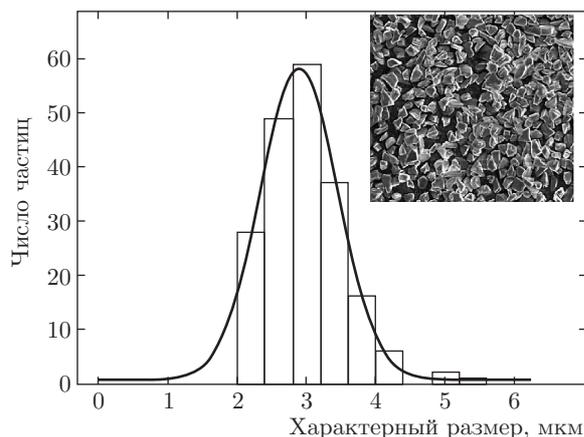


Рис. 2. Распределение частиц, использовавшихся в эксперименте, по характерному размеру, равному среднему от максимального и минимального размеров отдельной частицы. Сплошная линия — аппроксимация измерений нормальным распределением. Среднее значение характерного размера около 3 мкм

25 в ванне с жидким азотом 15 и осуществлял постепенное охлаждение разрядной трубки от комнатной температуры до температуры близкой к 77 К. Температура разрядной трубки регулировалась скоростью продувки охлажденного гелия. Для снижения температуры стенок разрядной трубки меньше 77 К нижняя часть криостата (до уровня капилляра разрядной трубки) заполнялась жидким гелием из дьюара 18 через ту же трубо-транспортную систему. Для облегчения теплового режима и снижения расхода жидкого гелия нижняя часть криостата помещалась в сосуд 14 с жидким азотом. Охлаждение стенок трубки, находящихся выше уровня жидкого гелия, осуществлялось парами интенсивно испаряющегося жидкого гелия. Управление температурой стенки разрядной трубки при этом затруднительно, однако эмпирическим подбором расхода жидкого гелия, жидкого азота в сосуде 14, а также мощности разряда удавалось стабилизировать температурный режим в диапазоне 4.2–77 К.

Полидисперсные частицы алмазной пыли ($\rho = 3.5 \text{ г/см}^3$) предварительно измерялись при помощи электронного микроскопа в ЦКП МФТИ (ГУ). Их распределение по размеру описывается нормальным распределением со средним значением 3 мкм (рис. 2). Коэффициент корреляции Пирсона [27] параметра асимметрии частиц и их размера равен $0.1 \ll 1$, что позволяет говорить об отсутствии явной зависимости между этими двумя параметрами частиц (рис. 3) и, следовательно, о большом разно-

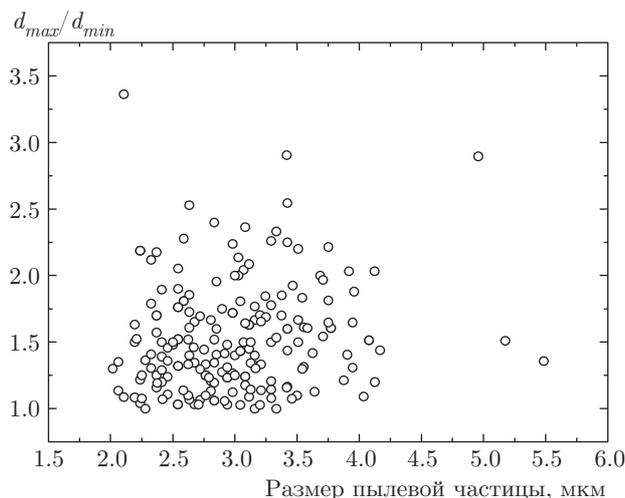


Рис. 3. Зависимость параметра асимметрии (отношения максимального размера частицы к минимальному) от размера пылевой частицы

образии форм для каждого размера пылевых частиц, использовавшихся в эксперименте.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Измерение межчастичных расстояний по видеофрагменту затруднено несколькими факторами:

- 1) лазерный нож направлен под углом 45° к оси трубки (вследствие этого пылевые структуры освещаются под углом, горизонтальные и вертикальные расстояния оказываются не разделенными, так как захватываются несколько горизонтальных и вертикальных слоев структуры);
- 2) пылевые частицы в структурах совершают колебания, амплитуда которых во многих случаях составляет не менее $1/10$ величины межчастичного расстояния;
- 3) часто происходит дефокусировка изображения частиц, связанная с уходом частиц из области пересечения лазерного ножа и фокальной плоскости, а также оптическим искажением, вносимым цилиндрическими стенками трубки.

В связи с этим для определения межчастичного расстояния используются следующие методы.

1. Если на кадре видеозаписи удастся выделить линейную цепочку частиц длины l , содержащую n частиц, то расстояние d определяется по формуле $d = l/(n - 1)$.
2. В противном случае на кадре видеозаписи рисуются окружности радиусом r , в которые попада-

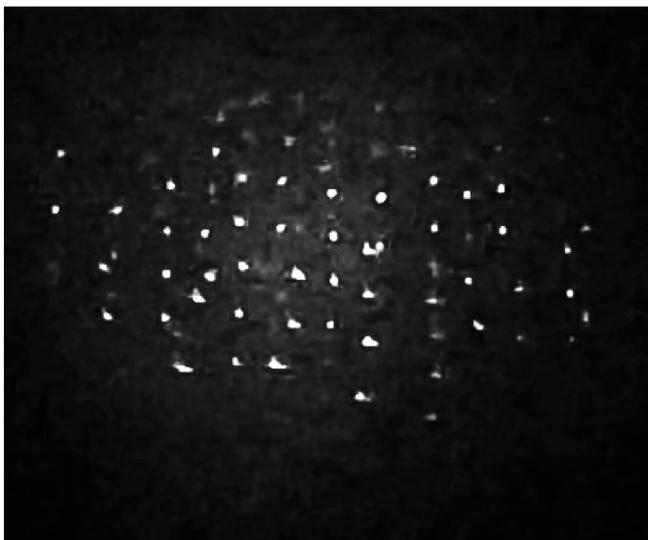


Рис. 4. Анизотропный плазменно-пылевой кристалл, состоящий из вертикально ориентированных цепочек, при температуре $T = 250$ К

ют n частиц, в среднем около 12. Каждая частица заключена в круг диаметром d , равным среднему межчастичному расстоянию. Благодаря высокой плотности таких кругов реализуется условие максимальной плотности упаковки, определяющее предельно возможную степень заполнения большого круга кругами меньшего радиуса ($\sim 90\%$). С учетом этого условия и различия вертикальных и горизонтальных расстояний в $\sqrt{2}$ раз из-за наклона лазерного ножа среднее межчастичное расстояние определяется из уравнения

$$n \frac{\pi d (d/\sqrt{2})}{4} = 0.90\pi r^2.$$

3. В наиболее сложных случаях, когда цепочки выделить не удастся и структура занимает маленькую область в поле зрения, расстояния измеряются непосредственно между 20–30 парами частиц и усредняются.

С учетом названных выше факторов, а также с учетом поправки на толщину лазерного ножа (частицы, между которыми измеряется расстояние, могут быть разнесены на расстояние порядка его толщины, оставаясь в поле зрения) и наличия случайной погрешности, имеем общую погрешность в измерении межчастичного расстояния примерно 30–70 мкм.

В качестве значения температуры нейтрального газа в области структуры выбирается усредненное значение показаний датчиков. Итоговая погреш-



Рис. 5. Анизотропный плазменно-пылевой кристалл, состоящий из вертикально ориентированных цепочек, при температуре $T = 170$ К. Заметно преобладающее вертикальное колебание пылевых частиц в цепочке

ность в определении температуры стенки составила от 1 до 3 К.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Пылевые структуры возникали в широком диапазоне параметров эксперимента практически при всех исследуемых температурах и давлениях. При температурах, близких к комнатной, они представляли из себя анизотропные кристаллы, состоящие из вертикально ориентированных цепочек (рис. 4, 5), или систему хаотически движущихся частиц. При температурах 10–19 К и 250–300 К, напряжении 0.92 кВ и значении тока разряда 0.78 мА наблюдалось образование достаточно длинных устойчивых цепочек из пылевых частиц, ориентированных в вертикальном направлении. Цепочки по длине занимали всю область, освещенную лазерным ножом, — около 8 мм. Они двигались хаотично и независимо друг от друга. Число частиц в цепочках изменялось от 10 до 40, таким образом, расстояние между частицами составляло от 200 до 800 мкм. Почти при всех температурах разряда наблюдались быстрые пылевые частицы, которые с большой скоростью летали вокруг и сквозь устойчивую плазменно-пылевую структуру. Наличие таких частиц может объясняться присутствием сильно асимметричных пылевых частиц.

Таблица. Классификация пылевых структур, возникающих в различных условиях эксперимента. Жирным шрифтом выделены результаты, полученные в данной работе и дополняющие классификацию, составленную в работе [20]

Пылевые структуры	T_c , К	λ_{Di} , мкм	Z	a , мкм	Источник
Анизотропные кристаллические из вертикально ориентированных цепочек частиц	300	40	—	500–750	[9]
		60–80	—	5	[29]
	293	37	3701.66	5	[28]
	200–300	50–75	—	3	[Наш результат]
Хаотически двигающиеся частицы	300	—	—	250–300	[25]
Упорядоченные цепочки частиц, ориентированные в вертикальном направлении		20	—	200–250	[9]
		30–40	—	5	[29]
	77	21	2752	5	[28]
	10–19 250–300	20 75	— —	3 3	[Наш результат] [Наш результат]
Цилиндрическое пылевое облако с поверхностным натяжением	77	15	—	20	[25]
Вибрирующая сфера	4.2	4	—	$a \sim \lambda_{Di} \approx 4$	[9]
			—	$< 20-30$	[29]
С винтовым вращением	4.2	3–4	—	10	[29]
С вихревым движением	4.2	3–4	2009	30	[9]
Колеблющаяся структура	11	8	—	3	[Наш результат]
	10	22	—	2–5	[30]
Вращающаяся сфера	4.2	4	20	5–6 при $\left(\frac{a}{\lambda_{Di}}\right)_{4.2 \text{ К}} \approx$ $\approx \left(\frac{a}{\lambda_{Di}}\right)_{77 \text{ К}}$	[25]

Анализ типов пылевых структур в условиях проведенного эксперимента позволяет дополнить классификацию, представленную в работе [20], для области температур 10–20 К и 200–300 К (жирным шрифтом в таблице выделены результаты, полученные в данной работе). В экспериментах [28] использовались сферические частицы из полистирола, а диаметр разрядной трубки составлял 1.2 см. В [29] использовались полые тонкостенные сферы из боросиликатного стекла, внутренний диаметр трубки — 3 см.

Замечено, что при увеличении тока разряда, а также при уменьшении давления стабильность пылевых структур уменьшалась. Это проявлялось в том, что из квазикристаллического состояния, в котором частицы достаточно долго совершали колебания амплитудой 20–50 мкм с частотой около 10 Гц около положений равновесия, структуры переходили в «жидкое» и даже «газообразное» состояние, в котором не имелось выделенного порядка, частицы двигались хаотично со скоростью порядка 1 мм/с. Время релаксации частиц в жидком состоянии (вре-

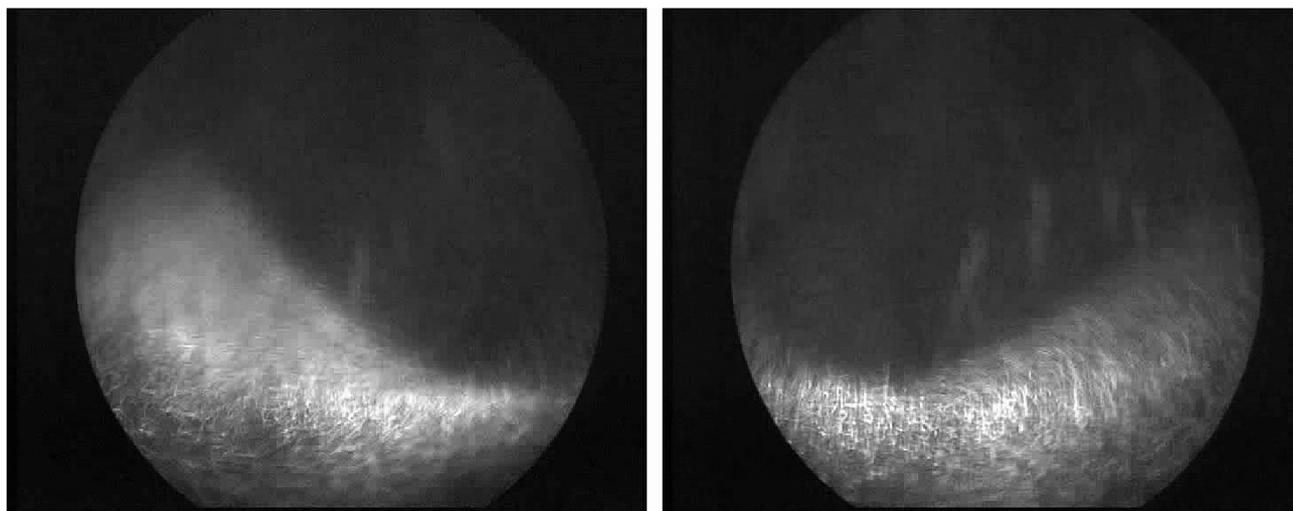


Рис. 6. Две фазы периодического изменения плазменно-пылевой структуры с частотой 10 Гц при температуре 11 К

мя, в течение которого частица находится в одном положении равновесия перед тем как перескочить в соседнее) при температуре 290 К и концентрации газа в трубке $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ составляет около 0.5 с.

Обнаружено, что при значениях тока 0.4–0.8 мА и давлениях 0.05–1.00 мбар частицы в структуре смещаются к периферии, плотность частиц в центральной области значительно уменьшается, сечение структуры напоминает сечение тора, параллельное его оси.

При температурах 9–12 К в образующейся структуре при малом вертикальном градиенте температуры (порядка 0.1 К/см) возникали колебания относительно горизонтальной оси, проходящей через центр структуры (рис. 6). Частота колебаний составляет 8–12 Гц, их раскачка происходит при инжектировании дополнительных пылевых частиц в разряд. Время затухания колебаний составляет от 10 до 90 с. Можно предположить, что наблюдаемые колебания представляют собой попадающие в поле зрения фазы вращения асимметричной структуры относительно оси разрядной трубки или циклическое изменение структуры. В статье [30] описаны похожие колебания пылевой структуры с частотой 3–4 Гц и сделано предположение, что это автоколебания, вызванные повышением температуры разряда на 10 К и затухающие за время порядка 2 мин.

На рис. 7 представлена зависимость межчастичного расстояния от температуры газа в разрядной трубке. Данные разбиты по узким диапазонам давления. Для сравнения на график помещены точки, полученные в работе [25]. При комнатной темпера-

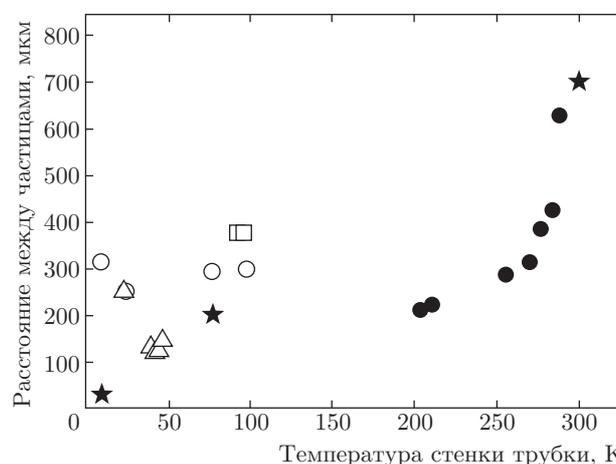


Рис. 7. Экспериментальная зависимость межчастичного расстояния от температуры. Данные разбиты по узким диапазонам давления. Круги соответствуют давлению 0.06 мбар, квадраты — диапазону давлений 0.21–0.26 мбар, треугольники — диапазону 2.55–2.66 мбар, закрашенные круги — диапазону 8.00–8.71 мбар. Звездами обозначены данные, полученные в работе [25]

туре расстояние между частицами составило от 500 до 700 мкм. Разброс значений может быть обусловлен зависимостью межчастичных расстояний как от концентрации ионов, так и от концентрации самих пылевых частиц. По ходу эксперимента неоднократно наблюдалась ситуация, когда инжектирование в плазму дополнительных пылевых частиц приводило к уплотнению исследуемой структуры. Попытка объяснить это явление представлена в разд. 5. С понижением температуры расстояния уменьшались

вплоть до значения 100 мкм при 50 К, затем вновь возрастали до 300 мкм при 9.2 К. Этот эффект может быть обусловлен изменением ионного состава плазмы, влиянием концентрации пылевых частиц, а также особенностями межчастичных взаимодействий при криогенных температурах.

5. СРАВНЕНИЕ С ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ, ОСНОВАННОЙ НА ПОТЕНЦИАЛЕ ЮКАВЫ

Для определения вида теоретической зависимости межчастичного расстояния от температуры рассматривается модель двух частиц, взаимодействующих по потенциалу Юкавы, в горизонтальной параболической ловушке $U_{trap} = \alpha r^2/2$ [31]. Для обоснования применения двухчастичной модели проведено исследование зависимости межчастичного расстояния в плазменно-пылевой структуре от числа частиц в ней. Рассматривается однослойная плазменно-пылевая структура, расположенная в горизонтальной плоскости, для которой можно пренебречь влиянием вертикальных сил (термофоретической, ионного потока, ионной тени и др.). Для моделирования системы заряженных пылевых частиц, взаимодействующих по потенциалу Юкавы, в параболической ловушке используется молекулярно-динамический пакет LAMMPS.

На рис. 8 приведены результаты для трех наборов заряда частиц и параметра ловушки. Обнаружено, что зависимость межчастичного расстояния от числа частиц в структуре аппроксимируется формулой

$$r(N) \approx b(q, \lambda_{scr}, \alpha)(1 - 0.25N^{0.16}),$$

где $b(q, \kappa, \alpha)$ — коэффициент, зависящий от заряда частиц q , длины экранирования λ_{scr} и параметра ловушки α .

Таким образом, решение уравнения равновесия для системы из двух частиц может быть масштабировано до системы из произвольного числа частиц изменением множителя. Это позволяет использовать предложенную теоретическую модель для анализа экспериментальных данных.

При решении уравнения равновесия предполагается, что взаимодействие частиц описывается потенциалом Юкавы, в который вместо дебаевской длины входит некоторое эффективное значение длины экранирования λ_{scr} [7]:

$$\varphi = -\frac{q}{|\mathbf{r}|} \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}|}{\lambda_{scr}}\right),$$

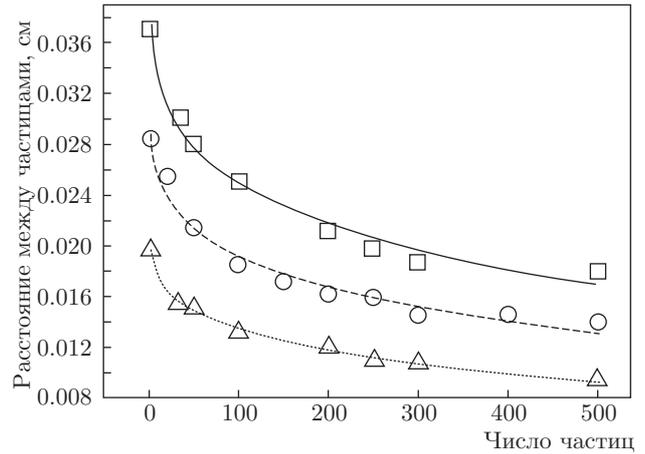


Рис. 8. Зависимости расстояния между частицами в плазменно-пылевой структуре от числа частиц в ней, полученные при помощи компьютерного моделирования (пакет LAMMPS). Точки соответствуют различным зарядам частиц и параметрам ловушки: $q = 5000e$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-2}$ ед. СГСЭ (квадраты); $q = 2000e$, $\alpha = 10^{-2}$ ед. СГСЭ (круги); $q = 8000e$, $\alpha = 5 \times 10^{-2}$ ед. СГСЭ (треугольники). Аппроксимационные кривые описываются формулами: верхняя кривая — $r = (0.051 \pm 0.001)(1 - 0.25N^{0.16})$, средняя кривая — $r = (0.040 \pm 0.001)(1 - 0.25N^{0.16})$, нижняя кривая — $r = (0.026 \pm 0.001)(1 - 0.25N^{0.16})$

где q — заряд частицы, r — расстояние между частицами.

В таком случае уравнение равновесия частиц, которое определяет равенство силы притяжения со стороны ловушки и силы взаимного отталкивания, имеет вид

$$-q \frac{\partial U_{trap}}{\partial \mathbf{r}} = -q \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{r}}.$$

Оно решается относительно зависимости межчастичного расстояния от температуры в предположении, что

$$r = \lambda_{scr} + \delta, \tag{1}$$

где $\delta \ll \lambda_{scr}$. Решение выглядит следующим образом:

$$r = \lambda_{scr} \frac{1}{\exp(1)\alpha\lambda^3/q + 5/7}.$$

Для получения температурной зависимости предполагается, что в рассматриваемых условиях температуры ионов и нейтральных частиц равны ($T_i = T_n = T$) вследствие малого различия их масс, заряд частиц и параметр ловушки в первом приближении зависят только от электронной температуры, а эффективная длина экранирования, как и дебаевская длина, пропорциональна корню

из температуры ионов ($\lambda_{scr} \propto \sqrt{T}$). Структуры, получаемые в ходе эксперимента, при высоких температурах содержат в горизонтальном слое от нескольких десятков до нескольких сотен частиц. С учетом зависимости от числа частиц, полученная в этом случае зависимость межчастичного расстояния от температуры имеет вид

$$r(T) = AT^{1/2} \frac{1}{BT^{3/2} + 5/7}. \quad (2)$$

Эта формула использована для аппроксимации экспериментальных данных в диапазоне температур 200–300 К при давлении 8.5 мбар. Полученные значения коэффициентов в формуле (2) равны $A = 11.4 \pm 1.6$, $B = (5 \pm 2) \cdot 10^{-5}$. Величина коэффициента показывает, что предположение (1) выполняется с хорошей точностью, так как значение выражения в знаменателе (2) при таких температурах близко к единице, а следовательно, значение r близко к значению λ_{scr} , стоящему перед дробью. Таким образом, введение эффективной длины экранирования имеет смысл.

При оценке отношения эффективной длины экранирования λ_{scr} к дебаевскому радиусу λ_D учитывается, что в ходе эксперимента при температурах 200–300 К концентрация нейтрального газа изменялась в диапазоне значений $(5 \cdot 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}) \text{ см}^{-3}$. Степень ионизации газа, соответствующая данному диапазону концентраций, в диффузном положительном столбе тлеющего разряда равна $10^{-7} - 10^{-8}$ [32], следовательно, концентрация ионов изменяется в пределах $5 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Большая часть атомов считается в данном диапазоне температур ионизированной однократно [33]. Вследствие того, что плазма неравновесная и электронная температура много больше ионной, дебаевский радиус считается равным ионному дебаевскому радиусу и рассчитывается по классической формуле:

$$\lambda_D \approx \lambda_{Di} = \sqrt{\frac{kT}{4\pi n_i e^2}}.$$

Таким образом, отношение эффективной длины экранирования к дебаевскому радиусу определяется по экспериментальным данным из формулы

$$\frac{\lambda_{scr}}{\lambda_D} = \frac{A\sqrt{4\pi n_i e^2}}{\sqrt{k}}.$$

В данном эксперименте

$$\frac{\lambda_{scr}}{\lambda_D} = 5 \div 15.$$

Полученный результат говорит о том, что потенциал Юкавы с эффективной длиной экранирования можно применять для теоретического описания структурных свойств плазменно-пылевой системы в области достаточно высоких температур (200–300 К), при которых влияние метастабильных атомов и молекул на состояние плазмы еще мало [33]. Выбор значения отношения эффективной длины экранирования к дебаевскому радиусу зависит от концентрации ионов.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведено экспериментальное и расчетное изучение плазменно-пылевых структур в режиме непрерывного изменения температуры в диапазоне от 5 до 300 К.

Обнаружено, что расстояние между частицами в структурах убывает с уменьшением температуры от комнатной до температур порядка 180 К. В этом диапазоне зависимость расстояния от температуры удовлетворительно описывается потенциалом Юкавы с эффективной длиной экранирования, отличной от ионного радиуса Дебая. Аппроксимация экспериментальных результатов показала, что эффективная длина экранирования в данных условиях приблизительно в 5–15 раз больше оценки ионного радиуса Дебая. В области криогенных температур в условиях данного эксперимента межчастичные расстояния либо не менялись, либо возрастали. Это указывает на то, что температура не является единственным параметром, влияющим на расстояние между пылевыми частицами в пылевых структурах при температурах ниже 180 К. Концентрация пылевых частиц, а также присутствие в разрядной плазме метастабильных ионов гелия также существенно влияет на структурные свойства плазменно-пылевой системы при криогенных температурах. Возможно, по этой причине при низких температурах не удалось подтвердить существование сверхплотной пылевой структуры [26], имеющей сферическую форму.

Изучены различные типы плазменно-пылевых структур: квазикристаллическое состояние при высоких температурах (200–300 К) и вертикальные линейные цепочки при низких (10–19 К). Обнаружено, что при увеличении тока или уменьшении давления, а также при инжектировании дополнительных пылевых частиц структуры разупорядочиваются и уплотняются, происходит переход к хаотичному движению частиц.

Определена частота колебаний плазменной структуры: 8–12 Гц при температуре 11 К.

Авторы благодарят ЦКП МФТИ за помощь в исследовании размеров пылевых частиц. Экспериментальная часть выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-02-01397-а). Обработка экспериментальных данных и теоретическая часть выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01295).

ЛИТЕРАТУРА

1. R. F. Wuerker, H. Shelton, and R. V. Langmuir, *J. Appl. Phys.* **30**, 342 (1959).
2. В. Н. Цытович, *УФН* **167**, 57 (1997).
3. P. K. Shukla and A. A. Mamun, *Introduction to Dusty Plasma Physics*, IOP, Bristol (2002).
4. В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак, В. И. Молотков, О. Ф. Петров, *УФН* **174**, 5 (2004).
5. R. L. Merlino, *AIP Conf. Proc.* **799**, 3 (2005).
6. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*, I-2, Янус-К, Москва (2005).
7. V. N. Tsytovich, G. Morfill, S. V. Vladimirov, and H. M. Thomas, *Elementary Physics of Complex Plasmas*, Lect. Notes in Phys. 731, Springer, Berlin, Heidelberg (2008).
8. О. С. Ваулина, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак, *Пылевая плазма: эксперимент и теория*, Физматлит, Москва (2009).
9. V. E. Fortov and G. E. Morfill, *Complex and Dusty Plasmas from Laboratory to Space*, CRC Press, London (2012).
10. P. Jensen, *Rev. Mod. Phys.* **71**, 1695 (1999).
11. N. M. Hwang, W. S. Cheong, D. Y. Yoon, and D. Y. Kim, *J. Cryst. Growth* **218**, 33 (1999).
12. H. Kersten, R. Wiese, G. Thieme, M. Froehlich, A. Kopitov, D. Bojic, F. Scholze, H. Neumann, M. Quaas, H. Wulff, and R. Hippler, *New. J. Phys.* **5**, 93 (2003).
13. C. K. Goertz, *Rev. Geophys.* **27**, 271 (1989).
14. T. G. Northrop, *Phys. Scripta* **45**, 475 (1992).
15. V. E. Fortov, A. P. Nefedov, O. F. Petrov, A. A. Samarian, A. V. Chernyshev, and A. M. Lipaev, *JETP Lett.* **63**, 187 (1996).
16. V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. M. Torchinskii, V. I. Molotkov et al., *JETP Lett.* **64**, 92 (1996).
17. A. M. Lipaev, V. I. Molotkov, A. P. Nefedov, O. F. Petrov et al., *JETP* **85**, 1110 (1997).
18. A. P. Nefedov, O. F. Petrov, V. I. Molotkov, and V. E. Fortov, *JETP Lett.* **72**, 218 (2000).
19. А. В. Недоспасов, *УФН* **94**, 3 (1968).
20. D. N. Polyakov, L. M. Vasilyak, and V. V. Shumova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **51**, 2 (2015).
21. В. В. Балабанов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортов, *ЖЭТФ* **119**, 1 (2001).
22. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, *ТВТ* **38**, 5 (2000).
23. В. Е. Фортов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. С. Зимнухов, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, *ДАН* **382**, 1 (2002).
24. В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак и др., *УФН* **47**, 447 (2011).
25. С. Н. Антипов, М. М. Васильев, С. А. Майоров, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов, *ЖЭТФ* **3**, 554 (2011).
26. С. Н. Антипов, А. В. Кириллин, В. Л. Низовский, *Криогенная плазма газового разряда*, Янус-К, Москва (2011).
27. K. Pearson, *Proc. Roy. Soc. A* **58**, 240 (1895).
28. S. N. Antipov, E. I. Asinovskii, A. V. Kirillin, S. A. Mayorov, V. V. Markovets, and O. F. Petrov, *JETP* **106**, 830 (2008).
29. S. N. Antipov, E. I. Asinovskii, V. E. Fortov, A. V. Kirillin, V. V. Markovets, O. F. Petrov, and V. I. Platonov, *Phys. Plasmas* **14**, 4 (2007).
30. S. N. Antipov, L. P. T. Schepers, M. M. Vasiliev, and O. F. Petrov, *Contrib. Plasma Phys.* **56**, 296 (2016).
31. Г. Э. Норман, В. В. Стегайлов, А. В. Тимофеев, *ЖЭТФ* **140**, 5 (2011).
32. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда*, Наука, Москва (1987).
33. А. А. Марковец, Дисс. ... канд. физ.-матем. наук, ИВТАН, Москва (1985).