

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В СМЕСЯХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

© 2022 г. Е. С. Дзлиева^a, С. А. Майоров^{b, c, d}, Л. А. Новиков^{a, *, **}, С. И. Павлов^a,
М. В. Балабас^a, И. Р. Крылов^a, В. Ю. Карасев^a

^a Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

^b Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^c Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^d Институт теоретической и экспериментальной физики,
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: plasmadust@yandex.ru

**e-mail: l.novikov@spbu.ru

Поступила в редакцию 24.06.2022 г.

После доработки 01.07.2022 г.

Принята к публикации 10.07.2022 г.

Размер левитирующих пылевых частиц зависит от условий разряда, варьируя параметры плазмы, можно управлять характеристиками пылевых структур. Представлен метод управления параметрами пылевой ловушки в стоячей страте путем создания смеси плазмоформирующего газа из инертных газов с отличающимися потенциалами ионизации — ксенона и гелия. Экспериментальный метод заключается в использовании полидисперсных частиц, из которых в ловушке отбираются частицы с размером, соответствующим условиям в плазме. Получены гистограммы распределений частиц по среднему размеру на основании учета около 1000 частиц. Показано, что в выбранных условиях эксперимента при добавке до 10% ксенона к гелию размер частиц максимально изменяется от 8.9 до 3.3 мкм. Выполнены численные оценки баланса сил.

Ключевые слова: пылевая плазма, тлеющий разряд, полидисперсные частицы, смесь инертных газов

DOI: 10.31857/S0367292122600741

1. ВВЕДЕНИЕ

Плазменно-пылевая ловушка, как и любая потенциальная яма или потенциально-диссипативная ловушка, характеризуется такими параметрами как глубина и ширина. Для экспериментально создаваемых ловушек в пылевой плазме [1], особенно в случае объемных ловушек в разряде постоянного тока, важна их устойчивость по положению в пространстве и стабильность по отношению к удержанию частиц различных размеров. Эта особенность очень важна при наличии специальных условий: криогенные температуры [2], сильное магнитное поле [3], большие размеры пылевых частиц. Например, использовался более “стабильный” для разряда газ Ag, менялся тип тлеющего разряда на RF-разряд [4]. В этом плане газ He — более удобный для замагничивания ионов, и он более изучен. Но при его применении возникает множество вопросов по формированию устойчивых для пылевой плазмы ловушек: наблюдаются резкие потери частиц, не исчезающие вплоть до полей 2.5 Тл [5], существует неоднозначность — экспериментально разряд форми-

ровался до полей 0.75 Тл в протяженных до 2 м соленоидах [6], в то время как теоретическое ограничение для самостоятельного разряда получено до 0.3 Тл в недавних работах [7]. Подбор строгих экспериментальных условий требует развития методов контроля и управления характеристиками пылевых ловушек и размером левитирующих пылевых частиц.

Для вариации размеров пылевых частиц представляется достаточно простым управление характеристиками пылевых ловушек. В низкотемпературной плазме в тлеющем разряде важнейшими параметрами являются температура (средняя энергия) и концентрация электронов. Температура электронов связана с напряженностью электрического поля и с величиной заряда пылевых частиц. Простой и эффективный способ ее изменения заключается в применении смесей плазмоформирующих газов. В газоразрядной плазме низкого давления существует нелокальный режим кинетики электронов [8]. Функция распределения электронов по энергии не является максвелловской, энергия электронов опреде-

ляется в неупругих потерях в зависимости от потенциала ионизации газа, например, в He и Xe она может отличаться практически вдвое. Добавление же малой доли газа с меньшим потенциалом ионизации к основному газу позволяет относительно плавно варьировать свойства пылевых ловушек.

Исследование в смесях газов, или управление свойствами разряда не является принципиально новым, ему посвящено несколько монографий [9, 10]. Новым решением является управление пылевой плазмой через применение смесей, а возможно, и диагностика разряда по измерениям размеров отобранных плазмой частиц. В серии работ [11–13] была предложена идея получения пылевых структур с нестандартными свойствами (межчастичное расстояние, тип упаковки, анизотропия). Также приведены численные расчеты кинетики и дрейфа электронов и ионов в смеси тяжелых и легких газов и паров металлов. Очень наглядным результатом оказалось увеличение скорости тяжелого иона в 10 раз и более при малой доли примесей [12]. В работе [14] результаты вычислений удалось проверить экспериментально за счет применения действия силы ионного увлечения, существенно возрастающей в смеси He и Xe.

Цель настоящей работы заключается в регистрации изменения размера (диапазона размеров) полидисперсных частиц в пылевой ловушке. Показано, что характерный размер частиц существенно изменяется при добавке к He малой доли Xe. Для собранных из ловушки частиц построены диаграммы распределений по размерам, количественно установлены изменения средних размеров частиц и ширин построенных распределений. На основании теории [11–13] выполнены численные оценки и сопоставлены с экспериментальными данными.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Постановка эксперимента

Идея экспериментального исследования заключается в следующем. Если для формирования пылевой структуры использовать полидисперсный порошок широкого размерного диапазона и произвольной формы частиц, то в соответствии с условиями левитации в пылевой ловушке в структуре будет отобрана определенная фракция частиц с некоторым средним размером. Меняя заданным образом условия разряда: поддерживая давление и разрядный ток, но, добавляя в гелий контролируемое количество ксенона, можно “настраивать” пылевую ловушку на определенный размер частиц. Для количественной оценки размера левитирующих частиц нужно два фактора: достаточно большое количество частиц (от 400) и

выбор характерной геометрической величины полидисперсных частиц “неправильной” формы, чувствительной к вариации состава газовой смеси. Для обеспечения первого фактора мы использовали объемную пылевую структуру в стоячей страте, способную к удержанию 6000 частиц и более с плотностью 2.5–4.3 г/см³ при оптимальных условиях [15, 16]. Для выполнения второго фактора использовались проекционные (двумерные) изображения частиц и сопоставление им среднего размера, используемого в газодинамике потоков частиц [17]. По изображению проекции частицы определялась ее площадь, и извлекался квадратный корень из ее значения. Данный способ определения характерного размера оказался более чувствительным при изменении процентного состава смеси и давления газа, чем ранее использованный нами метод на основе среднего из наибольшего и наименьшего проекционных размеров [15, 16].

Выбор условий эксперимента первоначально основывался на предсказаниях поведения потоков ионов и электронов в смесях различных газов [11–13]. Если в эксперименте к основному газу с большим потенциалом ионизации добавлять газ или пары металла с существенно меньшим потенциалом ионизации, то можно ожидать изменение целого ряда параметров. Наиболее существенные из них: замена сорта иона, падение электронной температуры/энергии, возрастание скорости потока ионов и, соответственно, температуры ионов. Изменения данных параметров приведут к изменению заряда пылевой частицы (даже при сохранении ее размера). Несколько процессов способны вызвать изменения как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Для точного выбора параметров эксперимента были проведены предварительные исследования. Во-первых, было обнаружено, что при одинаковом давлении и токе в чистых газах гелии и ксеноне пылевые ловушки неустойчивы и достаточно бедны частицами. В ксеноне ловушка эффективна при давлении не более 0.3 Торр, но в гелии она почти не заполнена при этих условиях. Поскольку, согласно [12], эффекты смешения газов работают при добавках до 5%, было решено ориентироваться на устойчивую ловушку именно в гелии, исключая работу в чистом ксеноне. Во-вторых, была изучена зависимость размера пылевых частиц в ловушке в чистом гелии в зависимости от давления. Оказалось, что частицы максимального размера в гелии удерживаются при относительно высоком давлении в 1 Торр. Кроме того, из [14] известно, что при близком давлении пылевая ловушка является устойчивой вплоть до добавки ксенона в 4%. В итоге было выбрано для проведения эксперимента давление в 1 Торр при токе разряда в 1.5 мА. При добавлении ксенона ловушка постепенно деградировала (страта переставала

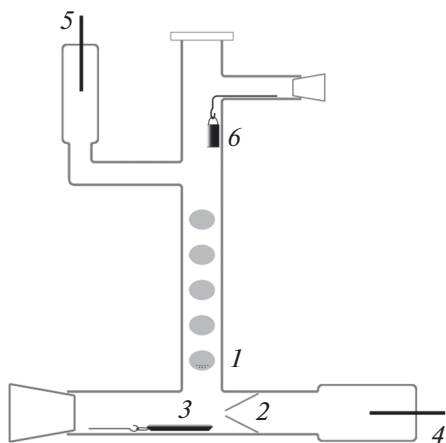


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – пылевая ловушка с исследуемыми частицами; 2 – стеклянная вставка, сужающая разряд; 3 – устройство для сбора частиц; 4 – катод; 5 – анод; 6 – контейнер с частицами.

быть резкой), но вплоть до примеси ксенона в 10% она была способна удерживать пылевые частицы.

2.2. Экспериментальная установка и результаты эксперимента

Методика эксперимента по улавливаю и извлечению пылевых частиц из разряда описана в [15, 16]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для исследования применялись полидисперсные частицы кварца с плотностью 2.5 г/см^3 . Засыпной порошок имел почти равномерное распределение по размерам в диапазоне от 1 до 25 мкм. Перед работой с каждой смесью газов разрядная трубка вскрывалась, очищалась от попавшего на нижнюю стенку порошка, откачивалась до уровня не хуже 10^{-4} Торр и тренировалась в разряде планируемого газа при повышенном токе в 15 мА.

Эксперимент проводился следующим образом. В приготовленной смеси газов зажигался разряд. В него вбрасывались частицы, часть которых левитировала в стратах, а часть падала вниз на горизонтальный участок трубки. Под вертикальный участок трубки подводилось собирающее устройство, и разряд выключался. Процесс попадания частиц из страты на собирающее стекло устройства контролировался визуально при осуществлении лазерной подсветки. Далее собирающее устройство извлекалось из разрядной камеры через боковой кран и помещалось под оптический микроскоп Axio Lab A1. Собранные частицы последовательно однократно фотографировались с увеличением в 600 крат. Далее, с помощью написанного для данного эксперимента

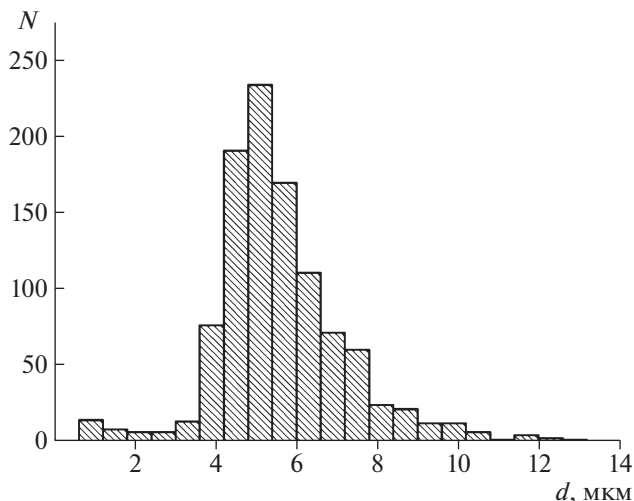


Рис. 2. Гистограмма распределения характерного размера пылевых частиц в смеси инертных газов He и Xe. N – число частиц, d – характерный диаметр. Условие: смесь с 95% He и 5% Xe, давление 1 Торр, ток разряда 1.5 мА.

пакета программ, определялся эффективный диаметр частиц (метод описан в п. 2.1) и строилась гистограмма распределения. Погрешность определения диаметра не более 0.3 мкм – учитывалось качество фотографий, погрешность эталонной шкалы, эффект расфокусировки пылевых частиц (на одной фотографии могло быть до 50 частиц разных размеров). На основе гистограммы, определялся наиболее вероятный размер, путем аппроксимации нормальным распределением. Эксперимент проводился в чистом гелии и его смесях с примесью ксенона в 1, 2, 5, 10%. Дополнительно был проведен эксперимент с неконтролируемо малыми “следами” ксенона в гелии. Для этого разрядная трубка длительно тренировалась в атмосфере ксенона, но для работы наполнялась чистым гелием. По сопоставлению вольтамперных характеристик мы оценили количество ксенона как не превышающее 0.05%. Данное сравнение может быть полезным для сопоставления с моделированием движения ионов ксенона в 100% газе гелия, приведенное в [12]. Пример гистограммы уловленных частиц для смеси с 5% Xe представлен на рис. 2.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Изменение параметров разряда в зависимости от доли ксенона

На рис. 3 показано изменение характерного размера частиц при увеличении примеси Xe в смеси. Уже при 5% добавке размер частиц уменьшается вдвое. Изменение размера, отнесенное к изменению процента Xe в основном реализуется

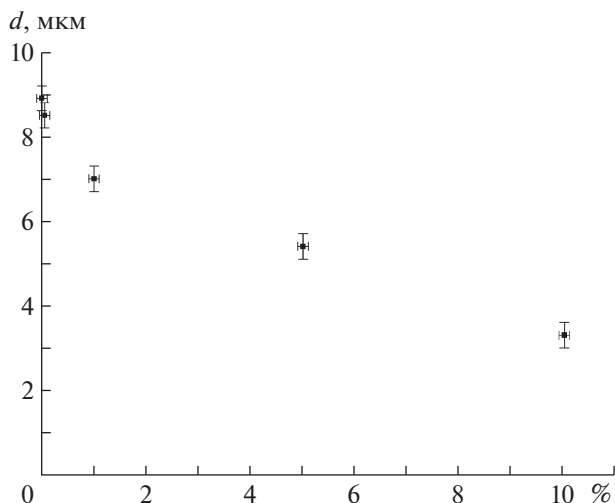


Рис. 3. Зависимость среднего размера пылевых частиц от процентного содержания Хе в смеси (He + Хе). Условия: давление 1 Торр, ток разряда 1.5 мА.

в диапазоне до 5%. При этом максимальное изменение зарегистрировано при наличии “следов” Хе — вторая точка графиков. Оценка его количества, проведенная по падению потенциала, дала значение 0.05%.

Можно ожидать, что добавка в гелий тяжелого газа с меньшим потенциалом ионизации приведет к падению напряженности электрического поля, а также к увеличению силы ионного увлечения как из-за увеличения скорости иона при отсутствии резонансной перезарядки, так и из-за увеличения массы иона. Это должно привести к изменению баланса сил и уменьшению удерживаемых в ловушке пылевых частиц. Качественно из данных на рис. 3 следует, что наибольшие изменения при примеси до 1% могут быть вызваны именно заменой ионов.

3.2. Численные оценки и качественная интерпретация

Изменения характеристик разрядной плазмы при добавлении используемой примеси нужно изучать количественно строго по зондовым и спектральным измерениям: напряженность поля, температура электронов. Теоретические расчеты [11–13] предсказывают изменение нескольких параметров сразу. Помимо названных, это энергия и скорость дрейфа ионов, а касательно пылевой частицы, это ее заряд. Сложность заключается в том, что изменяется несколько параметров, сдвигая баланс сил частицы в разные стороны. В проводимом исследовании уловленные пылевые частицы являются своеобразным “пылевым зондом”, дающим информацию об изменении свойств разряда. Далее на основе изменения раз-

меров (рис. 3) и данных расчетов [11–13], проведем оценку баланса удерживающих сил для пылевой частицы в чистом He и при добавке 5% Хе.

Для чистого He по характерному размеру частиц $d_1 = 8.9$ мкм вычислим силу тяжести $mg = 8.8 \times 10^{-12}$ Н. По измеренному падению потенциала, согласно [12] при $E/N = 50$ Тд, примем $T_e = 10$ эВ, $T_i^{eff} = 600$ К, и безразмерный заряд частицы $z = e^2 Z_d / a T_e = 1.6$. Тогда электрическая сила, удерживающая частицу, будет равна $qE = 10 \times 10^{-12}$ Н. Видно, что в чистом He баланс сил определяется без силы ионного увлечения F_{id} . Для нее проведем оценку по формуле, записанной в удобном для эксперимента виде

$$F_{id} = \frac{8}{3} \sqrt{2\pi a^2 V_T m_i} \frac{m_e v_e}{\pi e v_i R_0^2} \frac{I}{n_i u_i} \frac{z^2 \tau^2}{4} \Pi. \quad (1)$$

По сравнению со стандартной формой, в (1) скорость потока ионов выражена через электрическое поле, записанное через ток разряда I , а также учтены только наибольшие члены, связанные с рассеянием ионов, Π — модифицированный кулоновский логарифм [1], остальные обозначения стандартные. Численная оценка дает $F_{id} = 10^{-12}$ Н, что составляет порядка 10% от веса частицы.

На основании [12] можно выполнить оценку при добавке к He 5% Хе. Примем $T_e = 7$ эВ и $T_i^{eff} = 3000$ К, при $d_1 = 5.4$ мкм заряд $z = 1.6$, а зарядовое число $Z_d = 36000$. Удерживающая электрическая сила $qE = 12 \times 10^{-12}$ Н, что больше веса частицы $mg = 2.5 \times 10^{-12}$ Н. Для оценки ионного увлечения учитываем уменьшение частоты столкновений из-за отсутствия резонансной перезарядки. Значение $F_{id} = 10 \times 10^{-12}$ Н, что на 25% превышает вес частицы.

Приведенное сопоставление баланса сил для чистого He и смеси с 5% Хе показывает, что причиной изменения размера пылевых частиц в том, что крупные частицы из ловушки сбрасываются силой ионного увлечения, которая возрастает до 10 пН.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые были получены распределения характерных размеров пылевых частиц от процентного содержания Хе в смеси с He в тлеющем разряде. Были выполнены приблизительные оценки баланса сил, действующих на частицы в пылевой ловушке. Наглядно продемонстрирован метод, позволяющий контролировать параметры пылевой ловушки в разряде путем правильного подбора компонент ксенона и гелия в смеси. По-

лученные результаты могут быть применимы в диагностике плазмы, а сам метод можно применять для сепарации пылевых частиц в разряде.

Работа поддержана РФФ, грант № 22-22-00154.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фортков В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф.* // УФН. 2004. Т. 174. С. 494.
2. *Boltnev R.E., Vasilev M.M., Petrov O.F.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1556. P. 012076.
3. *Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu.* // Plasma Sources Sci. Tech. 2020. V. 29. P. 085020.
4. *Sato N.* // AIP Conf. Proc. 2002. V. 649. P. 66.
5. *Абдирахманов А.Р., Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И., Новиков Л.А., Досболаев М.К., Коданова С.К., Рамазанов Т.С.* // ТВТ. 2021. Т. 59. С. 657.
6. *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971.
7. *Maierov S.A., Kodanova S.K., Bastykova N.Kh., Golyatina R.I., Ramazanov T.S., Omiraliyeva G.K.* // Phys. Plasmas. 2022. V. 29. P. 043502.
8. *Golant V.E., Zhilinskii A.P., Sakharov S.A.* Fundamentals of Plasma Physics. New York: Wiley, 1980.
9. *Шибкова Л.В., Шибков В.М.* Разряд в смесях инертных газов, М.: Физматлит, 2005.
10. *Бочкова О.П., Шрейдер Е.Я.* Спектральный анализ газовых смесей, М.: Физматгиз, 1963.
11. *Майоров С.А.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 802.
12. *Майоров С.А.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. С. 869.
13. *Майоров С.А.* // Кр. Сооб. Физ. ФИАН. 2014. Т. 41. С. 20.
14. *Dzlieva E.S., Karasev V.Yu., Pavlov S.I., Ermolenko M.A., Novikov L.A., Maierov S.A.* // Contrib. Plasma Phys. 2016. V. 56. P. 197.
15. *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // ЖТФ, 2012. Т. 82. С. 147
16. *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 591
17. *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969.