

## СЕПАРАЦИЯ ЧАСТИЦ В ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ В СМЕСЯХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

© 2023 г. Л. А. Новиков<sup>a, \*, \*\*</sup>, В. Ю. Карасев<sup>a</sup>, С. И. Павлов<sup>a</sup>, М. В. Балабас<sup>a</sup>,  
И. Р. Крылов<sup>a</sup>, Е. С. Дзлизева<sup>a</sup>, С. А. Майоров<sup>b, c, d</sup>

<sup>a</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>b</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>c</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>d</sup> Институт теоретической и экспериментальной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби,  
Алматы, Республика Казахстан

\*e-mail: [plasmadust@yandex.ru](mailto:plasmadust@yandex.ru)

\*\*e-mail: [l.novikov@spbu.ru](mailto:l.novikov@spbu.ru)

Поступила в редакцию 16.08.2022 г.

После доработки 15.10.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Предложен и реализован метод управления размером пылевых частиц при вариации электронной температуры посредством добавления в разряд малой доли примеси газа с низким потенциалом ионизации. Показано, что при использовании максимально различающихся по массе инертных газов Не и Хе, размер отобранных пылевых частиц отличается вдвое. Выполнены численные оценки среднего размера отобранной частицы на основе баланса сил, действующих на пылевую частицу, с учетом влияния примеси на заряд частиц и скорость потока ионов. Метод настройки пылевой ловушки на размер удерживаемых частиц, работает в интервале порядка 1–10 мкм.

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

**DOI:** 10.31857/S0367292122600911, **EDN:** BIDNAK

### 1. ВВЕДЕНИЕ

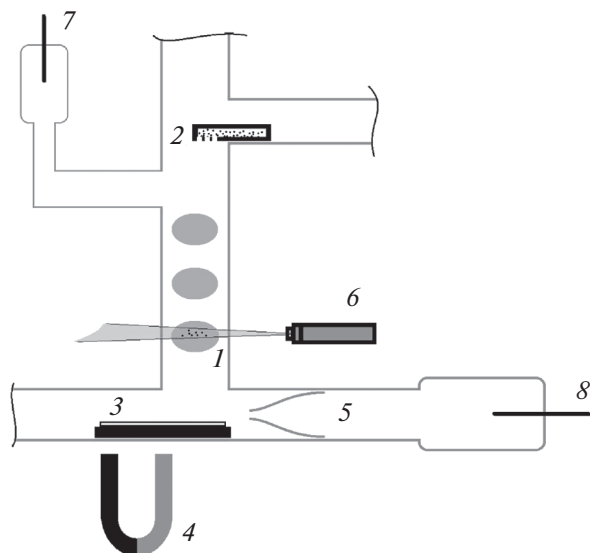
При формировании пылевой плазмы в плазменных ловушках происходит процесс самоорганизации [1–3]. С экспериментальной точки зрения он характеризуется рядом факторов в пылевой подсистеме: отбором частиц по размеру и форме, установлением величины межчастичного расстояния и типа упаковки частиц, соотношением заряда пылевых частиц и плотности плазмы. Для первого фактора возможно провести исследование с полидисперсными частицами произвольной формы в относительно широком диапазоне плазменных условий.

Одним из характерных параметров низкотемпературной плазмы является температура (средняя энергия) электронов [4–6]. Она главным образом задает основную характеристику пылевых частиц — их заряд, и существенно связана с величиной продольного электрического поля, удерживающего частицы в ловушке. Можно предположить, что, варьируя электронную температуру, например, при изменении газового состава плазмы, можно управлять характеристиками пылевой

подсистемы, прежде всего, размером и зарядом частиц.

Для реализации подобного метода управления размером пылевых частиц требуется использование разряда в смесях газов, возможно, для большей эффективности в газах с сильно различающимися потенциалами ионизации/массами, а также улавливание отобранных пылевых частиц непосредственно из плазменно-пылевой ловушки. В наших предыдущих работах был предложен способ улавливания и определения размеров пылевых частиц, левитирующих в ловушке в страте в тлеющем разряде в неоне [7–11], который можно применить и к смесям газов. В работах [12, 13] описаны исследования пылевой плазмы в бинарных смесях гелий-аргон и гелий-криптон. Но исследование зависимости размера пылевых частиц от параметров разряда (состава примененных смесей) в них не производилось.

Об экспериментах в разрядах в смесях газов литературные данные не многочисленны, но, например, монографии [14, 15] позволяют проанализировать проблему. Для выбора рабочих параметров эксперимента очень важен цикл работ [16–20], в котором рассчитаны характеристики



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – исследуемая пылевая ловушка в нижней страте; 2 – контейнер для инъекции частиц в разряд; 3 – устройство для сбора частиц; 4 – магнит, с помощью которого устройство (3) перемещалось вдоль горизонтальной части камеры; 5 – стеклянная вставка, стабилизирующая страты; 6 – лазерная подсветка для визуализации наличия частиц в ловушке; 7 – анод; 8 – катод.

дрейфа ионов и электронов, изменение электронной температуры в смесях при добавлении в инертные газы малых до 5% количеств легкоионизируемых газов и паров металлов, а также доли энергии электронов, расходуемых на ионизацию основного иона и иона примеси. С экспериментальной точки зрения сложность представляет создание плазменно-пылевой ловушки в сильно отличающихся газах при одинаковых параметрах разряда. Но можно полагать, что требуемые смеси плазмоформирующего газа можно осуществлять при малой/ограниченной доле тяжелого газа. Согласно [16–20], основные изменения характеристик дрейфа и энергии ионов и электронов должны происходить при крайне малых примесях, порядка единиц процентов.

В экспериментах с исследованием действия силы ионного увлечения на пылевую структуру в магнитном поле [21, 22] было показано, что добавка 5% Хе в основной газ Не, увеличивает скорость ионного потока настолько, что сила ионного увлечения возрастает вдвое. Таким образом, литературные данные показывают, что параметрами разряда можно управлять через изменение пропорции в смеси газов, таким образом, варьируя условия в пылевой ловушке.

В настоящей работе проводится экспериментальное исследование зависимости размера отобранных плазмой полидисперсных частиц кварца от малой доли Хе, добавленного в разряд Не. По-



**Рис. 2.** Пример изображения частиц, извлеченных из разряда после левитации при следующих условиях: смесь гелия и ксенона в соотношении 85:15 при давлении 0.67 Торр и разрядном токе 1.5 мА. Частицы – кварц. Цена деления шкалы 10 мкм.

лученная зависимость интерпретируется с учетом изменения заряда частиц, поля и скорости потока ионов, входящих в баланс действующих на пылевую частицу сил. На основании результатов можно создать метод тонкой настройки пылевой ловушки на улавливание заданного размера пылевых частиц.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

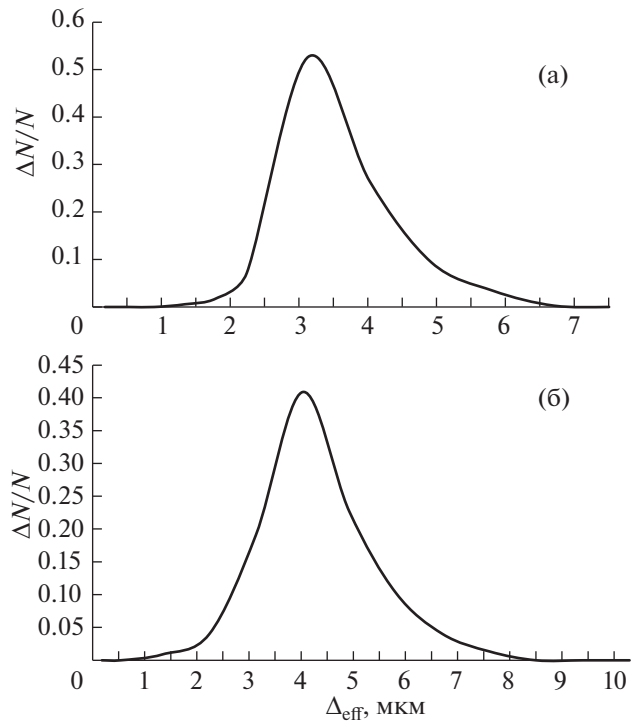
Метод улавливания пылевых частиц из плазменной ловушки в тлеющем разряде был предложен в [7, 8], в общих чертах он заключается в следующем. Применяется разрядная трубка специальной конструкции, имеющая внутри подвижное устройство для сбора пылинок (рис. 1). В случае пылевой ловушки в тлеющем разряде, стоячие страты формируются в вертикальном участке трубки. Пылевые частицы инжектируются в разряд из контейнера с сетчатым дном, расположенным в верхней части трубки. Нижняя часть трубки переходит в горизонтальный участок. С одной его стороны располагается катод, сюда проходит разряд, с другой стороны вне области разряда может перемещаться собирающее устройство. Последнее подводится под пылевую ловушку, при выключении разряда (либо при охлаждении нижней части стенки) левитирующие в плазме частицы падают на собирающее устройство. Процесс сбора пылевых частиц контролируется визуально при помощи лазерной подсветки. Пример собранных пылевых частиц, сфотографированных в оптическом микроскопе, показан на рис. 2.

Ключевой особенностью исследования является управление параметрами разряда (пылевой

ловушки) посредством смешивания плазмоформирующих газов с сильно различающимися потенциалами ионизации. В смеси He и Xe при изменении пропорций существенно меняются характеристики плазмы: электронная температура (средняя энергия), напряженность электрического поля, скорость дрейфа ионов и их средняя энергия, а также типа иона. Расчеты [18–20] показывают, что при степени ионизации газа порядка  $10^{-7}$  добавка долей процента Xe к основному газу He приводит к полной замене типа ионов. Как следствие происходит изменение заряда пылевой частицы, баланса сил и условия равновесия, а следовательно, и размера левитирующих в ловушке частиц. Это и было целью эксперимента.

В эксперименте использовался полидисперсный порошок кварца широкого размерного диапазона, отсеянный через сито с ячейкой в 25 мкм. При наблюдении в оптический микроскоп обнаружено, что в интервале от 1 до 25 мкм было равномерное распределение по размеру засыпных частиц. Особенности пылевых ловушек в двух применяемых газах заключаются в сильно различающихся величинах напряженности электрического поля и температур электронов. В Xe оптимальным для наполнения пылевой ловушки оказалось давление в интервале 0.1–0.2 Торр, в то время как в He оптимальным оказался диапазон 1.0–1.4 Торр. В предварительных экспериментах мы пытались найти условия, при которых при одинаковых давлениях и токах разряда можно собирать пылевые частицы в обоих рабочих газах. Так при токе  $i = 1.5$  мА, давлении  $p = 0.33$  Торр в разрядной трубке диаметром 1.9 см удалось собрать определенное количество пылевых частиц из ловушек в обоих газах. Эти предварительные эксперименты показали возможный диапазон размеров улавливаемых частиц: от 3 мкм в Xe до 7 мкм в He. Управление ионным увлечением в смесях газов [21, 22], а также теоретические расчеты [16, 17] указывают на то, что существенное изменение параметров разряда происходит при примеси Xe к основному газу He в количестве до 5%. В соответствии с этим, для основного эксперимента были выбраны следующие условия: давление смеси газов  $p = 0.7$  Торр, диапазон примеси Xe от 1 до 15%.

Перед каждым измерением производился контроль чистоты рабочего газа. Электроды длительно тренировались при повышенном токе, чистота газа контролировалась по ВАХ-разряда. При проведении эксперимента в приготовленной смеси газов зажигался разряд, вбрасывались пылевые частицы, их левитация в ловушках контролировалась посредством метода визуализации. Далее под ловушку (под вертикальный участок трубки) подводилось собирающее устройство, разряд гасился и пылевые частицы улавливались. Собранные на подложку пылевые частицы извлекались вместе с ней из разрядной трубки и помещались в



**Рис. 3.** Распределение частиц по размеру: условия соответствуют рис. 2 (а); смесь гелия и ксенона в соотношении 98 : 2 при давлении 0.67 Торр и разрядном токе 1.5 мА (б).

оптический микроскоп для фотографирования и дальнейшей обработки.

При наблюдении в микроскоп мы имеем образ частицы в двумерной проекции. Для оценки размера частиц используется ряд методов [23]. Применение простейшего из них, среднего проекционного размера ( $d = (x + y)/2$ , где  $x$  и  $y$  – максимальный и минимальный размеры), оказалось достаточно чувствительным к изменению как давления, так и типа плазмоформирующего газа. Например, для условий сбора частиц показанных на рис. 2, распределение частиц по размеру показано на рис. 3а, среднее значение порядка  $d = 3$  мкм. Для смеси гелия и ксенона в соотношении 98 : 2 пример распределения показан на рис. 3б, со средним значением порядка 4 мкм.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При обработке образов нескольких сотен пылевых частиц были построены их распределения по характерному размеру. Для каждого процентного соотношения смеси определены средние значения и ширины распределений. Зависимость среднего проекционного размера извлеченных частиц от процентного содержания газов представлена в табл. 1.

**Таблица 1.** Средний размер частиц в смесях

| Хе, %     | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 15  |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $d$ , мкм | 6.5 | 4.5 | 4.0 | 3.9 | 3.8 | 3.7 | 3.2 |

**Таблица 2.** Параметры плазмы в смесях

| N | Хе, %           | $T_e$ , эВ | $T_i$ , К | $M_{\text{eff}}$ | $\tau$ | $z$ |
|---|-----------------|------------|-----------|------------------|--------|-----|
| 1 | 0               | 5.2        | 1213      | 1.59             | 8      | 2.5 |
| 2 | 5               | 3.5        | 6051      | 2.35             | 10     | 3.5 |
| 3 | 15              | 2.9        | 600       | —                | 86     | 2.7 |
| 4 | 100 (0.03 Torr) | 2.5        | 487       | 0.88             | 100    | 3.0 |

Можно перечислить наблюдаемые количественные изменения. Во-первых, при добавлении Хе происходит уменьшение размера левитирующих пылевых частиц. Для выбранного давления размер частиц уменьшается от почти 6.5 мкм до практически 3 мкм при добавлении 15% Хе. Уменьшение размера частиц (как куб уменьшения веса) говорит об уменьшении глубины потенциальной ямы. Во-вторых, основное изменение параметров происходит при добавке не более 2%. Поскольку в этой области по измеренным ВАХ не происходило значительного изменения падения потенциала и визуальная картина стоячих страт не менялась, а спад электронной температуры происходит очень плавно, можно связать уменьшение размера частиц именно с заменой сорта иона. Согласно теории [16, 17], замена иона приводит к отсутствию резонансной перезарядки, возрастанию направленной скорости потока ионов, а как следствие, к возрастанию заряда пылевой частицы и увеличению действия силы ионного увлечения [21].

Для установления соответствия размера извлеченных частиц с балансом удерживающих их сил, выполним численные оценки, ряд известных параметров для них сведем в табл. 2. Колонки 3–5 заполнены по данным [16, 17], в колонке 5 приведена скорость потока ионов, выраженная в числах маха  $M_{\text{eff}}$ . Последние две колонки соответствуют безразмерному заряду пылевой частицы  $z = Z_d e^2 / (a T_e)$  и отношению температур электронов и ионов  $\tau = T_e / T_i$ . По этим значениям была вычислена сила ионного увлечения  $F_{\text{id}}$ , действующая вместе с силой тяжести вниз, и проведено ее сравнение с силами тяжести и удерживающей электрической силой. Напряженность электрического поля для вычислений оценена по экспериментальным данным.

Для первого ряда таблицы (в чистом гелии) баланс сил выглядит так:  $qE = mg \gg F_{\text{id}}$  ( $3.7 \times 10^{-12}$  Н и  $10^{-13}$  Н). Для второго ряда (5% ксенона) баланс сил:  $qE = mg + F_{\text{id}}$  ( $1.1 \times 10^{-12}$  Н и  $(0.8 + 0.3) \times$

$10^{-12}$  Н). Для нижних рядов ионное увлечение уже превышает силу тяжести:  $qE = F_{\text{id}} > mg$  (для 15% соответствующие значения сил: 1.5, 1.1 и 0.4 при  $10^{-12}$  Н). Можно сказать, что наблюдающееся почти вдвое уменьшение размеров пылевых частиц выбранной плотности при наибольшей доле Хе в смеси связано не только с изменением заряда пылевой частицы и поля в ловушке, но и с относительным увеличением роли силы ионного увлечения, доминирующей над весом частицы.

Экспериментальное определение размера пылевых частиц в стоячей страте в смесях газов и понимание изменения действующих на них сил позволяет использовать стоячую страту как ловушку, способную настраиваться на заданный размер удерживаемых пылевых частиц. При использовании более легких и наиболее востребованных полимерных частиц, диапазон улавливаемых размеров при данном методе существенно расширяется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ управления балансом сил, действующих на пылевые частицы в тлеющем разряде, за счет вариации состава плазмообразующего газа. Произведен сбор полидисперсных пылевых частиц из пылевой ловушки при малых добавках Хе в Не. Определена зависимость характерного размера частиц от процентной доли добавки Хе. Выполненные численные оценки баланса сил при учете влияния примеси на параметры разряда находятся в согласии с экспериментом и показывают, что даже при умеренных количествах Хе, в балансе сил сила ионного увлечения доминирует над силой тяжести. Результаты позволяют создать пылевую ловушку/пылевой фильтр, настраиваемый на заданный размер пылевых частиц.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shukla P.K., Mamun A.A.* Introduction to Dusty Plasma Physics. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2002.
2. *Tsytoich V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H.M.* Elementary Physics of complex plasmas. Berlin; N.Y.: Springer, 2008.
3. *Fortov V.E., Morfill G.E.* Complex and dusty plasmas: from laboratory to space. N. Y.: Taylor & Francis Group, 2010.
4. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
5. *Голубовский Ю.Б., Кудрявцев А.А., Некучаев В.О., Порохова И.А., Цендин Л.Д.* Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме. СПб.: Изво Санкт-Петербургского гос. ун-та, 2004.

6. *Цендин Л.Д.* // УФН. 2010. Т. 180. С. 139.
7. *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. С. 147.
8. *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 591.
9. *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. С. 51.
10. Патент № 2568898 С1 Российская Федерация, МПК В01D 59/48, В82В 1/00. Способ разделения полидисперсных частиц в микронном и наноразмерном диапазоне и устройство для его реализации: № 2014132470/07: заявл. 06.08.2014; опубл. 20.11.2015 / В.Ю. Карасев, Е.С. Дзлиева, М.А. Ермоленко, В.А. Полищук; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный университет” (СПбГУ).
11. Патент на полезную модель № 149100 U1 Российская Федерация, МПК В01D 59/48, В82В 3/00. Разрядная камера для разделения полидисперсных частиц в микронном и наноразмерном диапазоне: № 2014132655/07: заявл. 07.08.2014; опубл. 20.12.2014 / В.Ю. Карасев, Е.С. Дзлиева, М.А. Ермоленко, В.А. Полищук; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный университет” (СПбГУ).
12. *Maiorov S.A., Kodanova S.K., Dosbolayev M.K., Ratazanov T.S., Golyatina R.I., Bastykova N.Kh., Utegenov A.U.* // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. P. 033705.
13. *Антипов С.Н., Васильев М.М., Майоров С.А., Петров О.Ф., Фортвов В.Е.* // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. С. 554.
14. *Бочкова О.П., Шрейдер Е.Я.* Спектральный анализ газовых смесей. М.: Физматгиз, 1963.
15. *Шибкова Л.В., Шибков В.М.* Разряд в смесях инертных газов. М.: Физматлит, 2005.
16. *Майоров С.А.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. С. 869.
17. *Майоров С.А.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 802.
18. *Майоров С.А., Голятина Р.И., Коданова С.К., Рамазанов Т.С.* // Кр. сообщ. физ. ФИАН. 2012. № 1. С. 12.
19. *Голятина Р.И., Майоров С.А.* // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 5.
20. *Майоров С.А.* // Кр. Сообщ. Физ. ФИАН. 2014. Т. 41. С. 20.
21. *Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Yu., Pavlov S.I., Novikov L.A., Maiorov S.A.* // JETP Letters. 2014. V. 100. P. 703.
22. *Dzlieva E.S., Karasev V.Yu., Pavlov S.I., Ermolenko M.A., Novikov L.A., Maiorov S.A.* // Contrib. Plasma Phys. 2016. V. 56. P. 197.
23. *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969.