

04;12

Анализ размеров и формы полидисперсных пылевых частиц в комплексной плазме в тлеющем разряде

© Е.С. Дзлиева, М.А. Ермоленко, В.Ю. Карасев

Институт физики Санкт-Петербургского государственного университета,
198504 Петергоф, Санкт-Петербург, Россия
email: plasmadust@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 7 июля 2011 г. В окончательной редакции 18 ноября 2011 г.)

Методом извлечения из разрядной камеры пылевых частиц изучено распределение левитирующих частиц по размеру и фактору формы. Раздельно исследованы две пылевые ловушки, существующие в тлеющем разряде в стратах и над нижней стенкой трубки вблизи поворота канала тока. Установлено, что в стратах распределение полидисперсных частиц произвольной формы по размерам имеет бимодальный характер, что связано с одновременной левитацией частиц двух факторов формы. Для полидисперсных сферических частиц наблюдается левитация всех размеров частиц, что связано с сепарацией частиц по толщине стенки. При идентичных параметрах разряда размер частиц в неоне всегда несколько больше, чем в криптоне, размер частиц в ловушке в страте существенно больше, чем размер частиц в ловушке над стенкой разрядной трубки. Точное определение формы и размеров частиц позволило произвести для пылевых ловушек оценку напряженности электрического поля. Показано, что тлеющий разряд может использоваться как устройство для сепарации пылевых частиц в широком диапазоне размеров.

Введение

При исследовании лабораторной пылевой плазмы очень актуальными оказываются вопросы диагностики [1,2]. Пылевые структуры изменяют параметры разряда, влияют на химический состав плазмоформирующего газа [3–5]. Классические методы диагностики плазмы (например, метод зондов) в данной области не всегда применимы. Определение размеров частиц по рассеянию света дает однозначную интерпретацию лишь для частиц сферической формы, в то время как пылевые гранулы могут агломерировать и иметь отклонение от сферичности [6].

Для детального исследования характеристик левитирующих в плазме частиц можно использовать метод сбора и извлечения пылевых гранул из разрядной камеры предложенный в [7,8], где показано, что характерные размеры вбрасываемых и левитирующих частиц могут отличаться на порядок. Предложенная в работе [7] методика позволяет проводить количественные исследования сепарации порошков разрядом, изучать условия левитации.

Одним из приложений пылевой плазмы [9,10] может служить эффект отбора частиц в плазме, которая является сепаратором частиц по размеру и форме. Для создания технической базы приложения необходимы лабораторные исследования. Литературные данные говорят, что количественно условия левитации и сепарации не исследовались. Отметим, что в работе [11] оптическим методом обнаружено увеличение размера частиц в нижней части пылевого облака, в [12–14] авторы пытались разделить смеси частиц из магнитных материалов, используя градиент вертикального магнитного поля, изменить (облегчить) условия левитации для

тяжелых частиц, а также стимулировать агломерацию частиц магнитным полем.

В настоящей работе представлены детальные исследования сепарации пылевых частиц в плазме тлеющего разряда. В качестве изучаемого порошка выбраны полидисперсные порошки с частицами различной формы. Представлены статистические распределения извлеченных частиц в двух рабочих газах. Раздельно исследована левитация частиц в пылевых ловушках в стратах и над нижней стенкой разрядной трубки вблизи поворота канала тока, недавно обнаруженном в работе [15]. На основе динамики уединенных пылевых частиц дан анализ левитации частиц с полученными размерами и формой. Приведены элементарные оценки характеристик частиц и удерживающих электрических полей.

Эксперимент

Характеристики левитирующих частиц изучались в разрядной камере, конструкция которой представлена на рис. 1. Стеклопая трубка внутренним диаметром 1.8 см с длиной вертикального участка 12 см имела два верхних и два нижних горизонтальных боковых отростка. В верхних отростках располагались контейнер с засыпным порошком и анод, в нижних — катод (слева на рис. 1) и устройство для сбора и извлечения из разряда левитирующих частиц (справа). Устройство представляло собой металлическую пластину, перемещаемую с помощью постоянного магнита по горизонтальному отростку, на которую сверху помещалась полоска из покровного стекла. Устройство с собранным порошком извлекалось из разряда. Далее под микроскопом определялись размер и форма частиц.

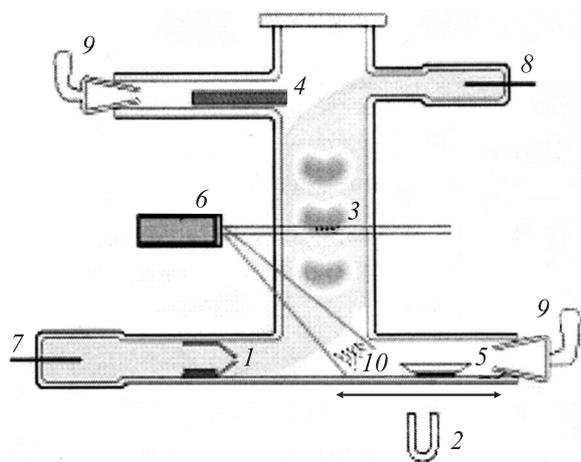


Рис. 1. Разрядная камера. 1 — подвижная вставка, 2 — магнит, 3 — страты, 4 — контейнер с засыпным порошком, 5 — устройство для сбора частиц, 6 — лазер, 7 — катод, 8 — анод, 9 — кран, 10 — структура в ловушке над стенкой трубки.

Для работы трубка откачивалась до давления 0.001 mm Hg , наполнялась воздухом, криптоном или неоном. В диапазоне давлений от 0.3 до 1 mm Hg и разрядных токах $1\text{--}5 \text{ mA}$ реализован стратифицированный режим тлеющего разряда. Узкая диафрагма для формирования стоячих страт в данной конструкции располагалась в горизонтальном отростке перед катодом (рис. 1). Она была подвижной, имела металлическую вставку, и ее положение для управления пылевыми ловушками изменялось при помощи постоянного магнита.

Для количественных исследований были использованы полидисперсные частицы кварца плотностью материала 2.5 g/cm^3 . В контейнер были засыпаны частицы размером до $45 \mu\text{m}$, имеющие произвольную форму и сильно выраженный максимум дисперсности при $35\text{--}45 \mu\text{m}$. Также применялись полидисперсные полые микросферы диаметром от 10 до $120 \mu\text{m}$ и плотностью $0.1\text{--}0.4 \text{ g/cm}^3$.

Эксперимент проводился следующим образом. При выбранных условиях зажигался разряд, в него инжектировались пылевые частицы. Некоторое их количество зависало в ловушках, что наблюдалось визуально при подсветке. Под собираемую пылевую структуру подводилось устройство для сбора частиц. Далее пылевая структура обрушивалась либо под действием силы темофореза при создании перепада температуры на стенках трубки, либо при гашении разряда. Процесс падения пылевых гранул и попадания их на поверхность собирающего устройства контролировался съемкой на видеокамеру. Собранные таким образом частицы вместе с устройством извлекались из разрядной камеры через кран в правом нижнем горизонтальном отростке (рис. 1). Число попадавших на стекло частиц в одном эксперименте составляло несколько тысяч.

Для определения характерных размеров полидисперсных частиц использовалась методика, описанная

в [16,17]. Определялись наибольший x и наименьший y — проекционные размеры частиц. Частицам сопоставлялся характерный размер $d = (x + y)/2$ и фактор формы $f = x/y$. Далее строились распределения числа собранных частиц по характерному размеру d и пропорциям f .

Результаты

Область разрядных параметров существования плазменно-пылевых структур (сорт газа, давление, ток разряда) в криптоме оказалась существенно меньше, чем в неооне. Поэтому приведем данные при оптимальных условиях в криптоме и для сравнения в неооне при подобных условиях. Во время проведения эксперимента было обнаружено наличие пылевой структуры, формируемой не в стратах, а над нижней стенкой камеры вблизи поворота тока разряда [15]. Анализ параметров обнаруженной пылевой структуры будет представлен отдельно [18] и др. Ниже будут даны результаты левитации частиц раздельно для ловушек в стратах и над стенкой камеры.

1. *Характеристики частиц, левитирующих в пылевой ловушке в стратах.* Рис. 2 показывает распределение по характерным размерам d частиц, извлеченных из ловушки в страте в криптоме при оптимальных условиях формирования объемной структуры. Гистограмма показывает наличие двух максимумов распределения при $d = 2$ и $6 \mu\text{m}$. Для выяснения причин наличия двух максимумов был проведен анализ распределений частиц по фактору формы, соответствующая гистограмма представлена на рис. 3, *a*. Она показывает, что левитирующие в стратах частицы разнятся по форме. Большинство частиц имеет фактор формы от $f = 1$ до $F = 2$. Исключив из общего распределения частицы с отношением размеров $1 : 1$, можно получить распределение по размерам только вытянутых частиц. Рис. 2, *c* показывает соответствующую выборку. Отчетливо видно одномодовое распределение с характерным размером $d = 4.5 \mu\text{m}$, частицам соответствует средняя пропорция $f = 2$.

В неооне параметры разряда для формирования пылевых структур более широкие. Приведем результаты только при условиях, соответствующих оптимальным к условиям в криптоме. Рис. 2, *b* показывает пример распределения левитирующих частиц по размеру также с явно выраженной бимодальной зависимостью при $d = 3$ и $6.7 \mu\text{m}$. Распределение этих частиц по фактору формы дано на рис. 3, *b*. Исключая компактные частицы, получаем распределение по размерам вытянутых частиц (рис. 2, *d*). Характерный размер составил $d = 7 \mu\text{m}$ при тех же средних пропорциях, как и в криптоме $f = 2$.

Пример распределения полидисперсных микросфер представлен на рис. 4. Объемные пылевые образования в стратах из таких частиц оптимально формируются в воздухе и его смесях с неоном. В представленных условиях

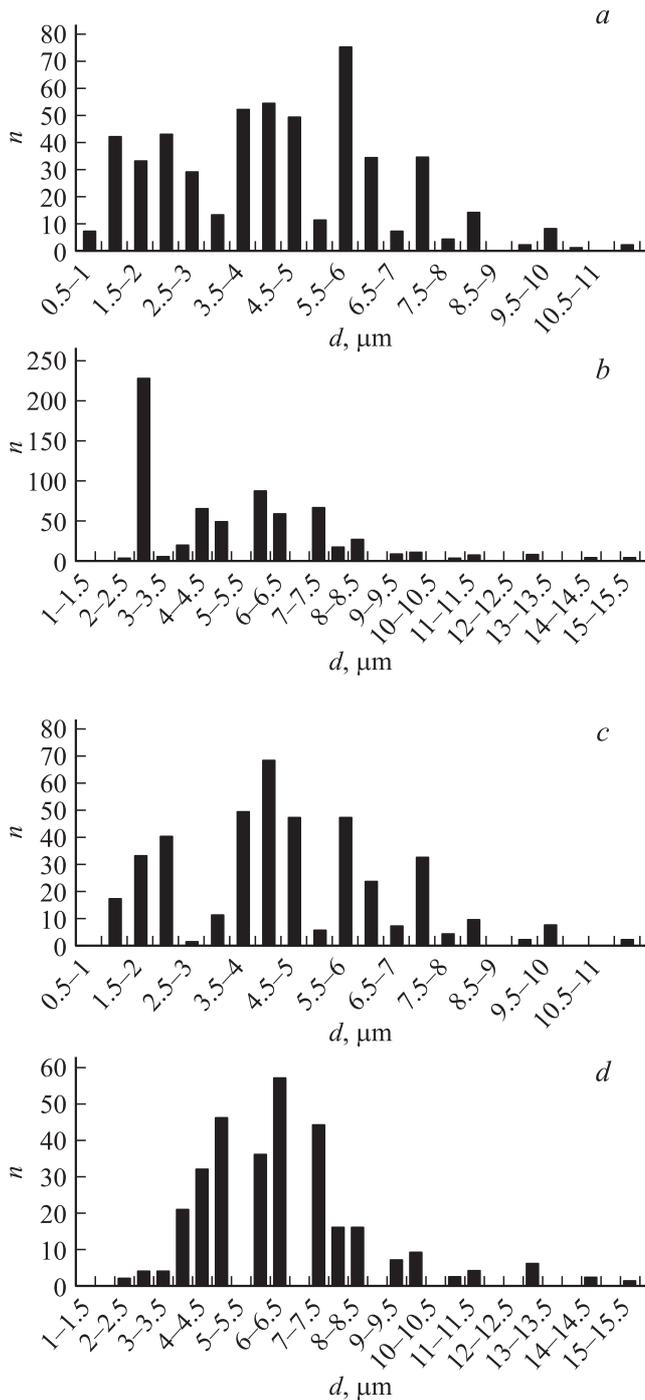


Рис. 2. Размеры раиств, извлеченных из пылевой ловушки в страте в криптоне — (a, c) и в неоне — (b, d). Условия: давление 0.3 mm Hg, ток 1.6 mA. a, b — все частицы; c, d — частицы не компактной формы.

левитируют частицы всех размеров, присутствующих в засыпном порошке.

II. *Характеристики частиц, левитирующих в пылевой ловушке над нижней стенкой трубки.* Для криптона размер и форма частиц при оптимальных условиях приведены на рис. 5, a, b. Основную массу

данных структур составляют частицы компактной формы $f = 1$ с характерным размером $d = 2 \mu\text{m}$. Размеры и форма полидисперсных частиц в этом плазменно-пылевом образовании отличаются от характеристик частиц, формирующих структуры в стратах при тех же условиях разряда. В неоне извлеченные частицы имеют близкие к наблюдаемым в криптоне параметры.

Путем длительного вбрасывания частиц в разряд и контроля условий оказалось возможным получить пылевые образования над нижней стенкой трубки сверхпротяженными, содержащими до 30 000 частиц [15,18]. И фактор формы, и характерный размер частиц в таких

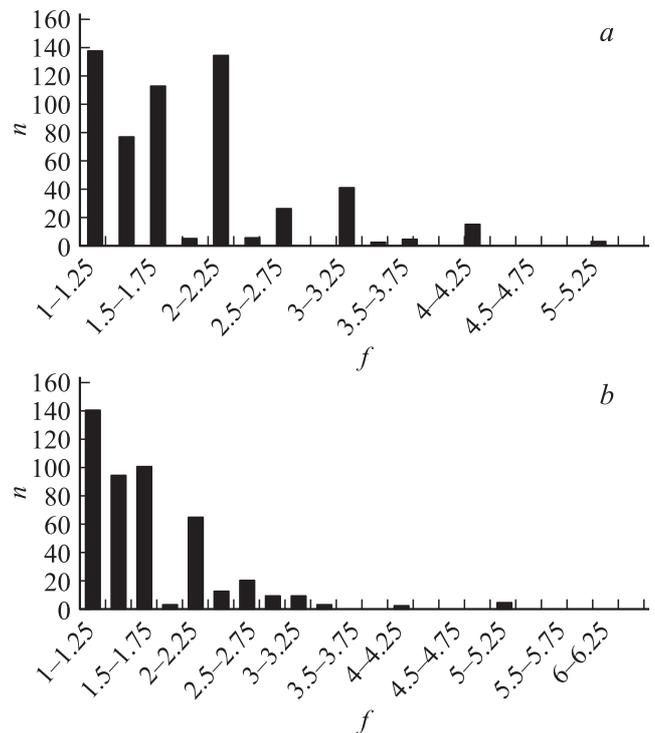


Рис. 3. Распределение частиц по фактору формы в стратах в криптоне — (a), в неоне — (b). Условия: давление 0.3 mm Hg, ток 1.6 mA.

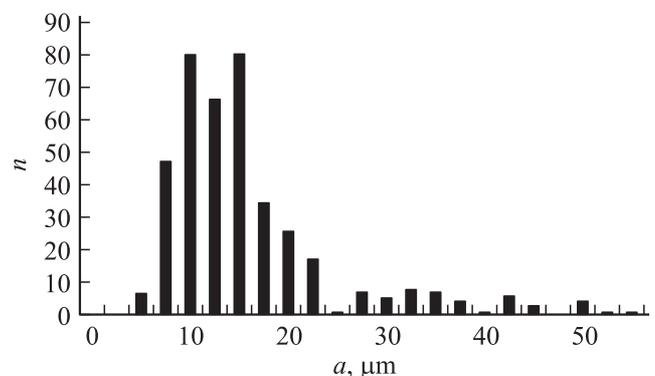


Рис. 4. Распределение по размерам полых микросфер, левитировавших в тлеющем разряде в страте. Условия: газ — неон, давление 0.2 mm Hg, разрядный ток 1 mA, a — радиус сферы. Гистограмма построена по данным для 400 частиц.

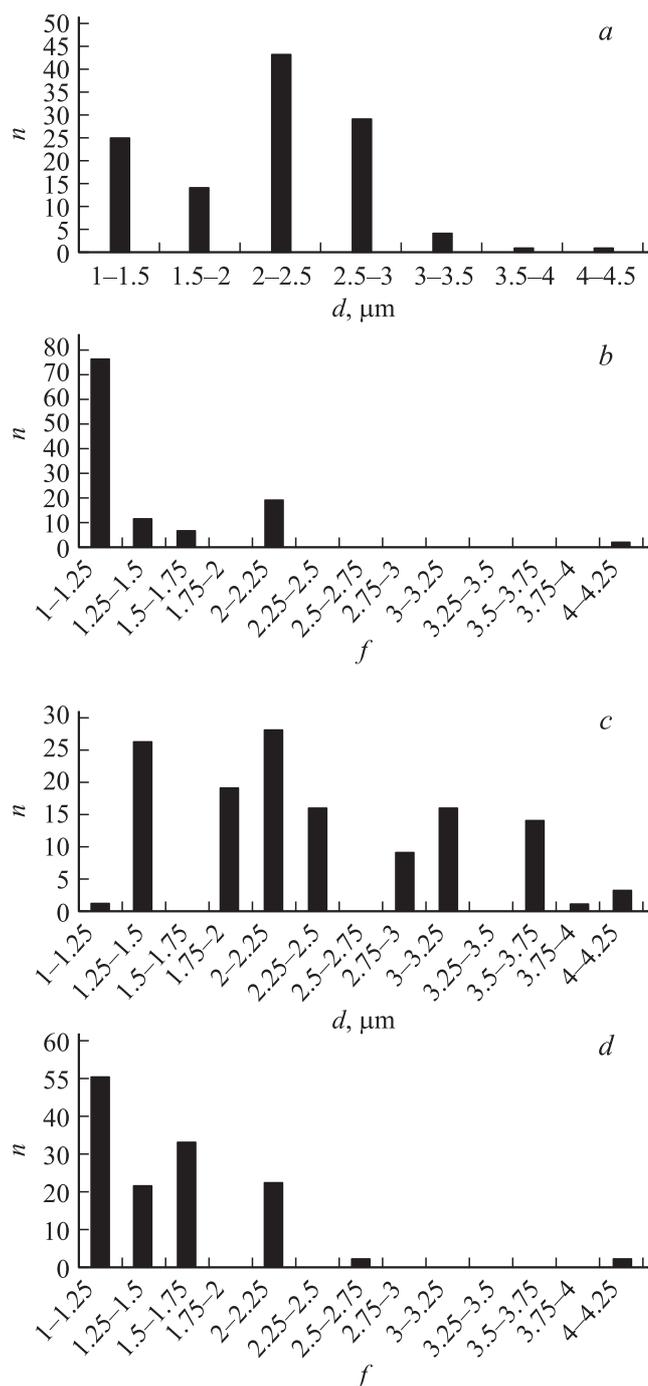


Рис. 5. Распределение частиц в ловушке над нижней стенкой камеры в криптоне по размеру — *a* и фактору формы — *b*, то же для объемной структуры — *c, d*. Условия: давление 0.3 mm Hg, ток 1.6 mA.

объемных образованиях изменяются. Для криптона они представлены на рис. 5, *c, d*. Результаты указывают на то, что в объемных структурах появляются частицы не компактной формы, а характерный размер частиц увеличивается.

Никакими вариациями параметров разряда не удалось подобрать условия, при которых в данной ловушке

формируются структуры из микросфер. Извлеченными частицами оказались осколки и фрагменты микросфер разного размера и формы.

III. *Оценки электрического поля в пылевой ловушке.* Численные оценки условий левитации частиц проще дать для неона, поскольку для него имеются данные о заряде частиц в стратах в зависимости от размера [1]. Из баланса силы тяжести и электростатической силы для частиц с известными размерами и зарядом в стратах получается следующее. Вертикальное электрическое поле в случае компактных частиц равно 10 V/cm, в случае частиц вытянутой формы 8 V/cm. Использование одновременно частиц двух характеристик повышает точность оценки. Среднее поле, определенное по частицам двух видов 9 V/cm.

В области над нижней стенкой трубки можно дать более приблизительную оценку электрического поля, поскольку в данной части разрядной камеры заряд частиц не измерялся, и точно не известна электронная температура, от которой он зависит. Оценка снизу для электрического поля дает величину 1–4 V/cm.

Оценки показывают, что минимальный размер сфер, способных левитировать в ловушке над стенкой трубки, меньше, чем минимальный размер сфер, присутствующих в засыпном порошке, что объясняет отсутствие их левитации. Присутствие в распределении в стратах всех размеров сфер из засыпного порошка говорит о сепарации сфер по массе (толщине стенки).

Заключение

В настоящей работе установлено, что в двух типах пылевых ловушек, существующих в тлеющем разряде, плазма удерживает пылевые частицы различного размера и фактора формы. Например, в криптоне при давлении 0.35 mm Hg и токе 1.6 mA в стратах удерживаются вытянутые частицы с характерным размером 5–7 μm, а над стенкой трубки частицы компактной формы размером 2–3 μm. Различный размер левитирующих частиц в стратах и в ловушке над нижней стенкой трубки связан с различной величиной удерживающего электрического поля. Знание актуальных размеров частиц позволило оценить существующее в них электрическое поле.

Обнаружено, что распределение частиц по размерам в стратах имеет два максимума, что связано с тем, что для частиц разной формы условия левитации выполняются при разном размере частиц. Таким образом, разряд сепарирует частицы по фактору формы.

Количественно изучена сепарация частиц в зависимости от сорта газа и условий разряда. В одинаковых разрядных условиях в неоне размер частиц всегда несколько больше, чем в криптоне, что связано с большей величиной продольного электрического поля неона в данном диапазоне давления [19,20]. От давления газа и разрядного тока характерный размер частиц зависит

слабо, но существенно зависит от объема пылевых структур и количества левитирующих в них частиц.

При условиях, когда в ловушке над стенкой трубки может левитировать лишь небольшое (до нескольких тысяч) количество частиц, в ней происходит отбор по фактору формы компактных частиц.

На основании количественных результатов отбора частиц плазмой можно сделать вывод, что плазма тлеющего разряда может быть использована в качестве устройства для тонкой сепарации мелких порошков в диапазоне от субмикронных до 10-микронных размеров для полидисперсных частиц произвольной формы от 10 до 120-микронных размеров в случае стеклянных полых микросфер.

Список литературы

- [1] Fortov V.E., Nefedov A.P., Molotkov V.I. et al. // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 87. P. 205 002.
- [2] Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортвов В.Е. и др. Пылевая плазма. М.: Физматлит, 2009. 314 с.
- [3] Фортвов В.Е., Петров О.Ф., Молотков В.И. и др. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
- [4] Podryadchikov S.F., Khakhaev A.D. // Intern. Conf. PPPT-III. Minsk, 2000. Vol. I. P. 336–339.
- [5] Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е. // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. № 3. С. 609–613.
- [6] Stoffels W.W., Stoffels E., Swinkels G.H.P.M., Boufnichil M., Kroesen G.M.W. // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 59. P. 2302.
- [7] Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И., Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А. // Вестн. СПбГУ, Сер. 4. 2009. № 1. С. 140–144.
- [8] Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Yu., Éikhaval'd A.I., Golubev M.S., Ermolenko M.A. // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 026 406.
- [9] Цытович В.Н. // УФН. 1997. Т. 167. С. 57–99.
- [10] Vladimirov S.V., Ostrikov K., Samarian A.A. Physics and Application of Complex Plasmas. / London: Imperial College Press, 2005. 439 p.
- [11] Petrov O.F., Vaulina O.S., Fortov V.E. // Intern Conf. PPPT-6. Minsk: IMAP NASB, 2009, V. 2. P. 859.
- [12] Samsonov D., Zhdanov S., Morfill G. // New Journ. Phys. 2003. Vol. 5. P. 24.
- [13] Yaroshenko V.V., Morfill G.E., Samsonov D., Vladimirov S. // IEEE Translations on Plasma Science. 2004. Vol. 32. P. 675.
- [14] Yaroshenko V.V., Morfill G.E., Samsonov D. et al. // New Journ. of Phys. 2003. Vol. 5. P. 18.
- [15] Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 1. С. 147–150.
- [16] Грин Х., Лейн В. Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969. 400 с.
- [17] Рюнкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 288 с.
- [18] Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. // ФНТП. 2011. Т. 2. С. 201–204.
- [19] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. С. 536.
- [20] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 544 с.