

# ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ДИНАМИКИ УЕДИНЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ ВОЛЧКОВ В КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Е. С. Дзлизева<sup>a</sup>, В. Ю. Карасев<sup>a\*</sup>, О. Ф. Петров<sup>b</sup>*

*<sup>a</sup> Институт физики Санкт-Петербургского государственного университета  
198504, Петергоф, Санкт-Петербург, Россия*

*<sup>b</sup> Институт теплофизики экстремальных состояний  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
125412, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 29 марта 2011 г.

На кинетическом уровне изучена динамика вращательного движения уединенных пылевых гранул в слабом магнитном поле. Обнаружены эффекты раскручивания сферических пылевых волчков и их выстраивания — магнитные моменты ориентируются по вектору магнитной индукции. Зарегистрировано изменение угловой скорости вращения вытянутых пылевых волчков в магнитном поле индукцией до 250 Гс. При изменении только величины индукции магнитного поля обнаружен переворот волчков. Результаты показывают наличие у пылевой плазмы парамагнитных свойств. Обнаруженным новым эффектам дана качественная интерпретация.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Комплексная плазма представляет собой пример самоорганизованной открытой системы, обладающей рядом уникальных термодинамических, механических и электрических свойств [1]. После обнаружения у пылевых частиц собственного вращения [2, 3] стало понятно, что пылевая подсистема комплексной плазмы обладает и магнитными свойствами. Пылевые волчки, имеющие на своей поверхности электрический заряд до  $10^6$  элементарных и вращающиеся с частотой до  $10^3$  Гц, обладают магнитными моментами величиной до  $10^5$  магнетонов Бора [4]. Хотя суммарный магнитный момент пылевого образования не велик [5], необходимо обратить внимание на ряд новых свойств, связанных с ориентацией и выстраиванием пылевых гранул в системе и во внешних полях [6, 7].

Изучение магнитных свойств комплексной плазмы также необходимо для полного понимания поведения пылевых структур во внешнем магнитном поле [8–11], наложение которого на пылевую структуру в последние годы стало существенным мето-

дом воздействия и управления пылевыми структурами [1, 12]. Магнитное поле может изменять механическое состояние пылевых образований, изменять порядок в системе [10, 13, 14], влиять на условия левитации частиц [15], оно применяется для возбуждения ударных и нелинейных волн в пылевых структурах [16, 17].

Пылевая гранула может иметь магнитный момент в двух случаях. Во-первых, благодаря использованию материала частицы с постоянной намагниченностью. Ряд исследований, выполненных с такими частицами, направленных на изучение условий левитации и процесса агломерации, был проведен в работах [15, 18, 19]. Во-вторых, может иметь место генерация магнитного момента поверхностным петлевым током вращающейся заряженной частицы. Последний случай рассматривается в настоящей работе. Исходя из того, что пылинки обладают собственным вращением в отсутствие внешнего магнитного поля [2–4], было решено исследовать динамику вращения пылевых частиц, величину и направление их магнитных моментов при наложении магнитного поля. В зависимости от величины магнитной индукции магнитные свойства пылевой плазмы определяются различными факторами. В слабом магнитном

\*E-mail: plasmadust@yandex.ru

поле замагничена только электронная компонента плазмы, основные исследования до сих пор проводились в этом диапазоне. В средних полях 0.1–0.3 Тл замагничены ионы и только в сильных полях 2–3 Тл замагничены сами пылевые гранулы, однако экспериментальные исследования в этом диапазоне поля практически отсутствуют.

В настоящей работе изучается динамика пылевых волчков в магнитном поле. В используемой установке оказалось возможным проводить наблюдения отдельных частиц в диапазоне магнитной индукции до 250 Гс, соответствующем замагниченности электронов. Основным результатом, полученным в работе, является регистрация количественного влияния магнитного поля на собственное вращение пылевых частиц сферической и асимметричной формы.

## 2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При планировании эксперимента мы исходили из результатов работ [2, 3] и задачи регистрации динамики вращения пылевых частиц в магнитном поле. В работе [2] при единственном значении поля 1000 Гс проводилось сравнение числа вращающихся частиц и их скорости с величинами в случае отсутствия поля, причем и количество наблюдаемых частиц, и сами конкретные частицы были различными. В настоящей работе эксперимент проводился при постепенном изменении магнитного поля с возможностью перемены его направления и непрерывном наблюдении за вращающимися частицами. С этой целью в пылевую ловушку каждый раз помещалась только одна пылевая частица, используемый для этого метод описан в работе [3].

Для детектирования вращения нужны пылевые частицы достаточно больших размеров. Использовались полидисперсные полые стеклянные микросферы плотностью 0.1–0.4 г/см<sup>3</sup>, при наблюдениях выбирались частицы размером от 10 мкм. Их удержание проводилось в пылевой ловушке, формирующейся в головной части страты. Режим стоячих страт в тлеющем разряде осуществлялся при токе 1–4 мА, давлении несколько десятых Торр, в неоне и его смесях с водородом при нескольких соотношениях. Применялась разрядная камера, детально описанная в работе [3] и модернизированная для экспериментов с использованием магнитного поля, см. рис. 1. Ее центральная часть (разрядная трубка) была ориентирована вертикально, соосно с направлением индукции магнитного поля, величина которой изменялась от 0 до 250 Гс в обе стороны. Пылевые частицы ле-

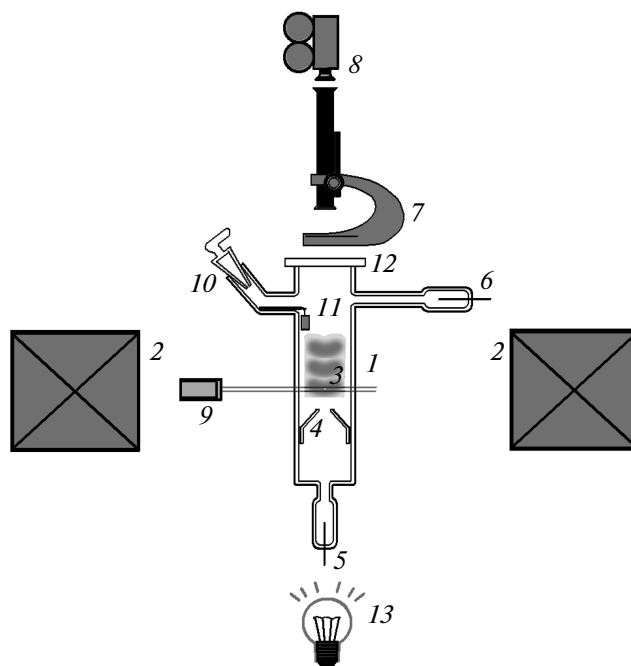


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 — разрядная трубка, 2 — магнитная катушка, 3 — пылевая частица в страте, 4 — разрядная диафрагма, 5 — катод, 6 — анод, 7 — оптическая система, 8 — скоростная видеокамера, 9 — лазер подсветки, 10 — вакуумный кран, 11 — контейнер с частицами, 12 — торцевое окно, 13 — нижняя подсветка

витиrowали в двух первых стратах в вертикальной трубке, в зависимости от условий разряда и величины индукции магнитного поля, в 6–9 см от оптической системы, расположенной сверху. Оптическая система, сконструированная на основе микроскопа МБС-10, была немагнитной, позволяла получать изображение находящейся в разряде частицы с увеличением порядка 100. Для визуализации частиц применялась лазерная подсветка в горизонтальной плоскости (сбоку от направления наблюдения) с помощью лазерного модуля КЛМ-20 с шириной пучка от 3 мм либо использовалось рассеянное излучение снизу (на просвет). Контроль фокусировки осуществлялся в один из окуляров микроскопа, второй был сопряжен с регистрирующей камерой. Использовался цифровой аппарат с полным мануальным управлением, а также скоростная видеокамера FastVideo-300.

Эксперимент проводился следующим образом. При выбранных условиях в отсутствие магнитного поля зажигался разряд, далее в него инжектировались частицы. При левитации в страте уединенной

пылевой гранулы определялись ее размер и форма, проводилась видеозапись ее движения. Последнее осуществлялось либо посредством скоростной видеосъемки, либо по методу координатной развертки. Метод развертки детально изложен в работе [3], в используемой системе он позволял регистрировать вращение с угловой скоростью до 12000 рад/с. Далее накладывалось магнитное поле, проводился контроль фокусировки с последующей записью движения частицы. Видеофайлы, сохраненные в формате AVI, подвергались обработке программными средствами для определения величины и направления угловой скорости пылевой частицы.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Эксперименты с частицами сферической формы

Первоначально для наблюдений выбирались сферически-симметричные частицы с минимальным количеством дефектов на поверхности, что определялось по интенсивности спектра рассеяния частиц при подсветке лазером. При анализе нескольких десятков проведенных наблюдений было установлено, что у таких частиц угловая скорость вращения отсутствует, вращение появляется как пороговый эффект либо при наложении магнитного поля с индукцией  $B \sim 100$  Гс, либо при увеличении разрядного тока до 3 мА и более.

Большинство частиц сферической формы имеют поверхностные дефекты. С ними связано их

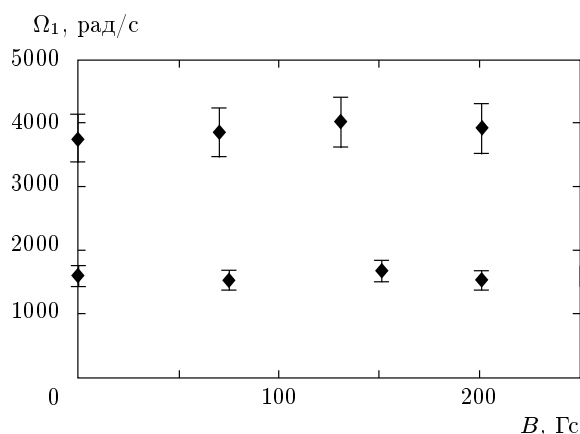


Рис. 2. Пример зависимости угловой скорости собственного вращения от магнитной индукции для двух частиц сферической формы размером 20 мкм. Условия: газ неон, давление 0.15 Торр, ток 1.3 мА

собственное вращение в отсутствие магнитного поля [3, 5, 7]. Магнитное поле в диапазоне 100–200 Гс слабо влияет на это вращение. Рисунок 2 демонстрирует зависимость скорости вращения  $\Omega_1$  от магнитной индукции и показывает ее изменение, лежащее в пределах погрешности.

В отсутствие магнитного поля оси вращения сферических частиц ориентированы произвольно. В магнитном поле подавляющая часть частиц имеет угловую скорость, направленную против вектора индукции. Магнитные моменты раскручиваемых сферических частиц ориентируются вдоль вектора магнитной индукции.

#### 3.2. Эксперименты с частицами несферической формы

Существенное влияние магнитного поля на скорость вращения частиц удалось наблюдать следующим образом. В засыпном порошке присутствует некоторая доля дефектных частиц. Вероятно, это сросшиеся или деформированные в процессе изготовления частицы, а также их фрагменты. Выборка пылинок вытянутой асимметричной формы из таких дефектных сфер показала следующее. В разряде вытянутые частицы ориентируются и левитируют в горизонтальной плоскости. Вокруг осей их фигур существует быстрое вращение с угловой скоростью  $\Omega_1$ , обладающей теми же свойствами, что и у сферических частиц, см. [3]. Помимо  $\Omega_1$  для таких частиц обнаружено относительно медленное вращение с угловой скоростью  $\Omega_2$ , с которой сами оси фигур поворачиваются вокруг вертикальной оси (рис. 3а). Оно возникает в отсутствие магнитного поля, но количественно изменяется при его наложении.

На основании анализа поведения нескольких десятков частиц, отобранных из сотен наблюдений, обнаружено следующее. У частиц, обладающих существенно вытянутой геометрической формой, угловая скорость вращения  $\Omega_2$  вокруг вертикальной оси в отсутствие магнитного поля направлена против силы тяжести. Ее величина для наблюдаемых частиц порядка 100 рад/с. Наложение магнитного поля обоих направлений приводит к слабому изменению величины скорости, см., например, рис. 4. Для разных частиц наблюдаются различные — возрастающая или убывающая — зависимости от магнитной индукции фиксированного направления. При убывающей зависимости по мере увеличения магнитной индукции возможно уменьшение скорости  $\Omega_2$  до нуля с дальнейшей переменной ее направления.

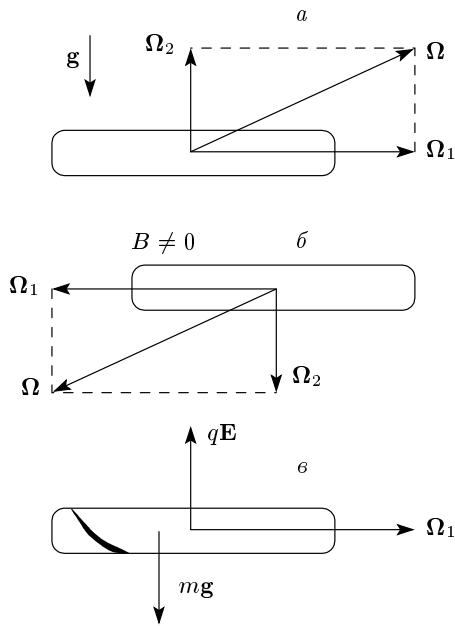


Рис. 3. Поясняющая схема. Вращение пылевой частицы вытянутой формы в отсутствие магнитного поля (а), переворота частицы (б). Для дефектной вытянутой частицы точка приложения электрической силы не совпадает с точкой приложения силы тяжести (в), схематически показан дефект типа утолщения стенки частицы и связанное с ним смещение центра инерции. Существуют быстрое вращение вокруг оси фигуры частицы с угловой скоростью  $\Omega_1$  и относительно медленное вращение вокруг вертикальной оси с угловой скоростью  $\Omega_2$

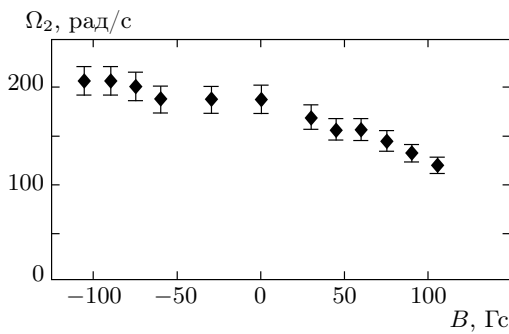


Рис. 4. Пример зависимости вертикальной составляющей угловой скорости собственного вращения асимметричной пылевой частицы от магнитной индукции. Условия: газ — смесь неона с водородом 2 : 1, давление 0.3 Торр, ток 3.0 мА, частота съемки 150 Гц

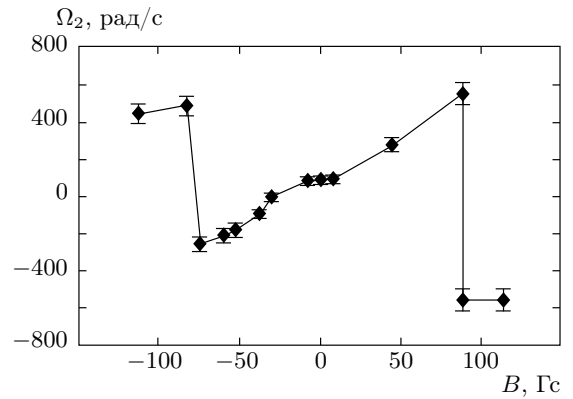


Рис. 5. Зависимость вертикальной составляющей угловой скорости собственного вращения асимметричной частицы от магнитной индукции. Зависимость имеет гладкий участок и скачкообразные изменения, связанные с переворотами частицы. Условия: газ — смесь неона с водородом 2 : 1, давление 0.3 Торр, ток 2.1 мА, частота съемки 1000 Гц

Для частиц, у которых величина вертикальной угловой скорости в магнитном поле достигает существенно больших значений, 500 рад/с и выше, наблюдается немонотонное скачкообразное изменение зависимости. Пылевая частица переворачивается, вертикальная составляющая угловой скорости меняет знак без изменения величины. Характерный пример эффекта демонстрирует рис. 5, см. также рис. 3б. Отметим, что скачок может происходить в обоих направлениях, частица может последовательно переворачиваться несколько раз, но скачок наблюдается только в момент изменения магнитного поля. При неизменных разрядных условиях, величине и направлении магнитной индукции вертикальная угловая скорость каждой частицы остается неизменной.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

##### 4.1. Сферические частицы

При наблюдении частиц сферической формы обнаружено два эффекта: возникновение вращательного движения в магнитном поле и изменение ориентации векторов угловых скоростей изначально вращающихся частиц. Они ориентируются против вектора магнитной индукции, т. е. наблюдается выстраивание магнитных моментов частиц вдоль вектора магнитной индукции.

Причиной возникновения вращения в магнитном поле может быть азимутальная составляющая ионного увлечения, существующая благодаря непрерывному потоку плазменных частиц на поверхность пылевой гранулы в процессе поддержания ее заряда. Однако причина порогового характера возникновения вращения остается неясной.

Сравнить наблюдаемое поведение частиц с имеющимися литературными моделями механизмов вращения в магнитном поле [20–22] пока не представляется возможным. В настоящем эксперименте наблюдались уединенные (в отличие от [20]), диэлектрические (в [21] рассмотрены проводящие) частицы. Они находились на оси симметрии разряда, где радиальное поле отсутствует (нет влияния скрещенных полей, рассмотренного в [22]). Возможно, наблюдения в увеличенном диапазоне магнитного поля такое сравнение с моделями позволят выполнить.

#### 4.2. Несферические частицы

Относительно асимметричных частиц можно сказать следующее. Причина быстрого вращения частиц вокруг осей их фигур (появляющегося в отсутствие магнитного поля) та же, что и для сферических частиц [3]. В отсутствие магнитного поля вращение самих осей фигур вокруг вертикальной оси имеет определенное направление — вектор угловой скорости  $\Omega_2$  всегда направлен вверх (рис. 3а). Причиной может быть прецессия быстро вращающейся частицы вокруг оси своей фигуры (в горизонтальной плоскости) под действием силы тяжести. В самом деле, вытянутая частица подобна симметричному волчку, опору которого обеспечивает электрическая сила, направленная вертикально вверх и являющаяся поверхностной силой. Для таких частиц центр инерции в силу дефектов будет смещен вдоль оси фигуры на величину  $l$  (в горизонтальной плоскости), сравнимую с толщиной стенки сферы, точка приложения силы тяжести не совпадает с точкой «опоры» волчка (точкой приложения электрической силы  $qE$ ), рис. 3в. Как результат, возникает вынужденная прецессия под действием силы тяжести, угловая скорость которой направлена против силы тяжести [23]:

$$\Omega_2 = \frac{mgl}{I\Omega_1}. \quad (1)$$

Согласно оценкам, угловая скорость прецессии может составлять сотню рад/с, что согласуется с наблюдениями.

При наложении магнитного поля с индукцией 100–150 Гс у частиц наблюдается либо уменьшение (рис. 4), либо увеличение (рис. 5, центральная часть графика) угловой скорости вращения частицы. Можно предположить существование механизмов, сообщающих частицам вращательные моменты разных знаков. В зависимости от характеристик конкретной частицы (структуры дефектов, особенностей геометрии торцевых поверхностей) один из механизмов будет доминировать. Тогда для выбранной частицы характер зависимости — уменьшение или увеличение — угловой скорости в магнитном поле остается неизменным, но для частиц с разной структурой дефектов он будет различным.

Поскольку угловая скорость вынужденной прецессии  $\Omega_2$  обратно пропорциональна угловой скорости вращения вокруг оси фигуры волчка  $\Omega_1$ , изменение  $\Omega_1$  вызывает соответствующее изменение  $\Omega_2$ . Например, при  $\Omega_1$ , равной 1000 рад/с, ее изменение в магнитном поле 200 Гс на 5–10% (даже лежащее в пределах погрешности, аналогично изменению на рис. 2) дает согласно формуле (1) изменение  $\Omega_2$  на 50–100 рад/с, что согласуется с наблюдениями (рис. 4 и центральная часть рис. 5).

Особенности геометрии и левитации вытянутых пылевых частиц позволяют существовать и другому механизму, связанному с передачей импульса потоком плазменных частиц на торцевые части вытянутой перпендикулярно магнитному полю пылевой частицы. В пылевой плазме импульс, передаваемый ионами, обычно преобладает над импульсом, передаваемым электронами. Это приводит к появлению угловой скорости  $\Omega_2$ , совпадающей по направлению с вектором магнитной индукции, что соответствует центральной части графика на рис. 5. Точные численные оценки затруднительны, поскольку однозначно не определена величина потока на торцевые поверхности вытянутой частицы.

Заметим, что прецессию пылевого волчка, вызванную магнитным полем, не видно на фоне более быстрых движений. Ее угловая скорость определяется выражением

$$\Omega = \frac{qB}{2m}, \quad (2)$$

где  $q$  — заряд частицы,  $m$  — ее масса, что дает численное значение  $\Omega = 10^{-3}$  рад/с.

О немономонном изменении угловой скорости — скачках на зависимости, представленной на рис. 5, можно предположить следующее. У частицы имеется два положения равновесия, когда проекция магнитного момента частицы направлена по индукции магнитного поля и против нее. При увеличении поля

сама пылевая ловушка (стоячая страта) несколько смещается, оказывая на вращающийся пылевой волчок импульсное воздействие, что вызывает переворот. При таких толчках наблюдаются переходы в оба направления, от устойчивого равновесия к неустойчивому и обратно.

Таким образом, для наблюдаемых фрагментов динамики пылевых волчков в магнитном поле (постепенном и скачкообразном увеличении или уменьшении угловой скорости вращения) можно предложить качественное объяснение и в некоторых случаях дать элементарную оценку. Каждая конкретная пылевая частица будет иметь свою определенную, не меняющуюся со временем зависимость угловой скорости собственного вращения от индукции магнитного поля.

## 5. ВЫВОДЫ

В работе непосредственно на кинетическом уровне проведено прямое наблюдение динамики уединенных пылевых волчков, определяющих магнитные свойства комплексной плазмы. Для симметричных сферических частиц наблюдается возникновение вращения в слабом магнитном поле и изменение ориентации векторов угловой скорости. Оба явления показывают наличие у пылевой плазмы парамагнитных свойств.

Впервые обнаружено изменение вертикальной составляющей угловой скорости собственного вращения пылевых частиц в магнитном поле на примере частиц вытянутой асимметричной формы. Зарегистрировано линейное изменение угловой частоты вращения при относительно малых ее значениях, порядка 10–30 Гц, и скачкообразное изменение при больших значениях частоты, порядка 70–100 Гц. Таким образом, показано, что поведение уединенного пылевого волчка в магнитном поле зависит от величины его магнитного момента.

Для обнаруженных эффектов предложена качественная интерпретация, включающая в рассмотрение прецессию пылевых волчков и передачу импульса плазменными частицами пылевой частице в плоскости, перпендикулярной направлению индукции магнитного поля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Фортов, О. Ф. Петров, В. И. Молотков, УФН **174**, 495 (2004).
2. N. Sato, AIP Conf. Proc. **799**, 97 (2005).
3. V. Yu. Karasev, E. S. Dzlieva, A. I. Eikhval'd et al., Phys. Rev. E **79**, 026406 (2009).
4. В. Ю. Карасев, А. И. Эйхвальд, Е. С. Дзлиева, Вестник СПбГУ, сер. 4: физика, химия **4**, 113 (2008).
5. N. V. Tsytoich, N. Sato, and G. E. Morfill, New J. Phys. **5**, 43 (2003).
6. E. S. Dzlieva, M. A. Ermolenko, M. S. Golubev et al., Int. Conf. «Dusty Plasma in Applications», Odessa, p. 37 (2010).
7. V. Yu. Karasev, E. S. Dzlieva, M. A. Ermolenko, M. S. Golubev, and A. Yu. Ivanov, Contrib. Plasma Phys. **51**, 509 (2011).
8. N. Sato, G. Uchida, and T. Kaneko, Phys. Plasmas **8**, 1786 (2001).
9. U. Konopka, D. Samsonov, A. V. Ivlev et al., Phys. Rev. E **61**, 1890 (2000).
10. V. Yu. Karasev, E. S. Dzlieva, A. Yu. Ivanov et al., Phys. Rev. E **74**, 066403 (2006).
11. L. G. D'yachkov, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, Contrib. Plasma Phys. **49**, 134 (2009).
12. *Complex and Dusty Plasmas*, ed. by V. E. Fortov and G. E. Morfill, CRC Press, New York (2010).
13. Е. С. Дзлиева, А. Ю. Иванов, В. Ю. Карасев и др., Опт. и спектр. **98**, 621 (2005).
14. Е. С. Дзлиева, А. Ю. Иванов, В. Ю. Карасев и др., Опт. и спектр. **101**, 882 (2006).
15. D. Samsonov, S. Zhdanov, and G. Morfill, New J. Phys. **5**, 24 (2003).
16. V. E. Fortov, O. F. Petrov, V. I. Molotkov et al., Phys. Rev. E **71**, 036413 (2005).
17. V. E. Fortov, O. F. Petrov, V. I. Molotkov et al., Phys. Rev. E **69**, 016402 (2004).
18. V. V. Yaroshenko, G. E. Morfill, D. Samsonov, and S. Vladimirov, IEEE Trans. Plasma Sci. **32**, 675 (2004).
19. V. V. Yaroshenko, G. E. Morfill, D. Samsonov et al., New J. Phys. **5**, 18 (2003).
20. O. Ishihara and N. Sato, IEEE Trans. Plasma Sci. **29**, 179 (2001).
21. S. I. Krasheninnikov, Phys. Plasmas **13**, 114502 (2006).
22. S. I. Krasheninnikov, V. I. Shevchenko, and P. K. Shukla, Phys. Lett. A **361**, 133 (2007).
23. Д. В. Сивухин, *Общий курс физики*, т. 1, Наука, Москва (1974).