

## ПЫЛЕВЫЕ ЧАСТИЦЫ В ТЕРМОФОРЕТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ В ПЛАЗМЕ

*Л. М. Василяк\*, С. П. Ветчинин, В. С. Зимнухов, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортвов*

*Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур  
Российской академии наук  
125412, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 14 июня 2002 г.

Показана возможность удержания заряженных пылевых частиц в плазме с помощью сил термофореза. Экспериментально получена протяженная пылевая структура в положительном столбе тлеющего разряда при температуре жидкого азота. Пылевая структура удерживается в электростатически-тепловой ловушке, в которой вертикальная устойчивость обеспечивается суммарным воздействием силы продольного электрического поля и сил термофореза. Для анализа ловушек такого типа можно использовать общие принципы, разработанные для удержания частиц в ловушках с помощью электрических и магнитных мультипольных полей. Используя различные температурные поля, удалось изменить форму и объем структуры и даже разделить ее на части.

PACS: 52.25.-b

Упорядоченные структуры из заряженных пылевых частиц с сильным кулоновским взаимодействием наблюдаются в неравновесной плазме низкого давления в заряженных электрических слоях, которые фактически являются электростатическими ловушками [1]. В тлеющем разряде такие структуры наблюдаются в стратах, в ВЧ-разряде — в заряженном слое вблизи электродов. При равновесии заряженной пылинки сила тяжести уравнивается продольным электрическим полем, которое в слоях существенно выше, чем в окружающей плазме, и неоднородно по высоте, а амбиполярное электрическое поле удерживает частицы в поперечном сечении. Количество удерживаемых частиц зависит от размера ловушки и может меняться от нескольких десятков до нескольких тысяч. Частицы могут упорядочиваться, выстраиваясь в достаточно правильную кристаллическую структуру, либо их поведение напоминает жидкость. Возникающие структуры являются диссипативными, так как заряд пылинок поддерживается балансом потоков электронов и ионов на их поверхность, и из-за большой подвижности электронов в тлеющем и ВЧ-разрядах заряд всегда отрицательный и достигает значений

$q = 10^4$ – $10^5$  зарядов электрона.

Для существования в плазме электростатической ловушки необходимо наличие градиентов концентрации заряженных частиц, что в свою очередь приводит к неоднородности электрического поля в слое, которая связана с возникновением как продольного, так и радиального амбиполярного электрических полей. Наличие в ограниченной плазме источников тепловыделения приводит к наличию градиентов температуры и к возникновению сил термофореза, действующих на пылевые частицы. В работах [2, 3] показано, что существование различных форм и структур плазменно-пылевых образований, висящих в электростатических ловушках, зависит в первую очередь от условий равновесия в радиальном направлении, так как характерные размеры ямы, удерживающей частицы, в радиальном направлении существенно меньше, чем в продольном. Радиальное амбиполярное электрическое поле, действующее на заряженные пылевые частицы, направлено к оси разрядной трубки. Силы, толкающие пылевые частицы к стенкам, вызваны ионным трением и силой термофореза. Последняя пропорциональна градиенту температуры газа и направлена в ту же сторону, что и поток тепла, обусловленный теплопроводностью нейтрального газа. В большинстве экс-

\*E-mail: lab852@ihed.ras.ru

периментов, в которых пылевые частицы удерживались в заряженных слоях, силы ионного трения существенно меньше сил термофореза. В этом случае все силы пропорциональны соответствующим градиентам и, как показано в [2], можно ввести понятие потенциальной энергии для частиц, удерживаемых в электростатически-тепловой ловушке. В общем случае эти же силы будут определять равновесие пылевых частиц в неоднородном тепловом поле и в продольном направлении.

Принцип удержания заряженных частиц в естественных ловушках типа страт в сильно неоднородной плазме аналогичен общим принципам удержания частиц в специальных ловушках с помощью электрических или магнитных мультипольных полей, которые давно с успехом применяются в физике молекулярных пучков, масс-спектрометрии и физике ускорителей заряженных частиц [4]. Частицы могут быть захвачены в ловушку или сфазированы, если на них действует упругая связывающая сила, которая линейно возрастает с увеличением расстояния:

$$F = -cr,$$

или, другими словами, если частица движется в параболическом потенциале

$$\varphi \propto \alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2.$$

Для потенциальных полей из уравнения Лапласа

$$\Delta\varphi = 0$$

следует условие

$$\alpha + \beta + \gamma = 0,$$

которое приводит, например, при  $\alpha = \beta = 1$ ,  $\gamma = -2$  в цилиндрических координатах к трехмерной ловушке с потенциалом [4]

$$\varphi = \varphi_0 \frac{r^2 - 2z^2}{r_0^2 + 2z_0^2},$$

причем  $2z_0^2 = r_0^2$ .

Следует отметить, что именно с такой конфигурацией потенциала были выполнены первые эксперименты по пленению заряженных частичек алюминия микронного размера в квадрупольной ловушке в 1959 г. [5]. Дополнительно использовалась динамическая стабилизация орбит отдельных частиц с помощью низкочастотного периодического электрического поля с частотой 50 Гц. С помощью буферного газа было погашено случайное движение частиц, и было обнаружено, что частицы выстраивают-

ся в регулярную структуру, образуя кристалл. В аналогичной ловушке наблюдалась псевдокристаллизация ионов после их охлаждения лазерным лучом [6]. Ионы сдвигались в такое положение, где сила кулоновского отталкивания компенсируется фокусирующими силами в ловушке, а энергия всего ансамбля имеет минимум.

При описании плазменно-пылевых структур, ви-сящих в слое объемного заряда, например, в приэлектродных слоях ВЧ-разряда, в которых впервые наблюдались пылевые структуры частиц [7], условие

$$\alpha + \beta + \gamma = 0$$

будет нарушаться, поскольку для заряженного слоя используется уравнение Пуассона. В то же время для тепловых полей без источников применимо уравнение Лапласа, и можно использовать общие принципы создания ловушек.

В газоразрядной плазме низкого давления существенное влияние на движение пылевых частиц и на их равновесное положение в пространстве оказывают силы термофореза [2, 3]. С помощью сил термофореза можно не только менять положение и форму пылевого облака, но и удалять пылевые частицы из разряда под действием градиента температуры нейтрального газа. При низком давлении газа сила термофореза равна

$$F_T = -4PLa^2\nabla T/T,$$

где  $P$  — давление нейтрального газа,  $L$  — длина свободного пробега молекул,  $a$  — радиус пылевой частицы, причем  $L \gg a$ . В плазме тлеющего разряда сила радиального амбиполярного электрического поля, удерживающего заряженные пылевые частицы, равна

$$F_E = qkT_e\nabla n/n,$$

где  $T_e$  — электронная температура,  $n$  — концентрация электронов. В ионизационно-диффузной модели распределение концентрации электронов как в положительном столбе, так и в страте описывается функцией Бесселя  $J_0(2.4r/R)$ , где  $R$  — радиус трубки, поэтому сила  $F_E$  вблизи оси пропорциональна радиусу и растет более резко при приближении частицы к стенке трубки. Если тепловыделение в плазме осесимметрично, то сила термофореза вблизи оси также пропорциональна радиусу.

Удержание облака частиц в продольном направлении в однородном положительном столбе невозможно, поскольку нет градиентов электрического поля, и частицы, находясь в состоянии безразлично-го равновесия, будут уходить вдоль оси разрядной

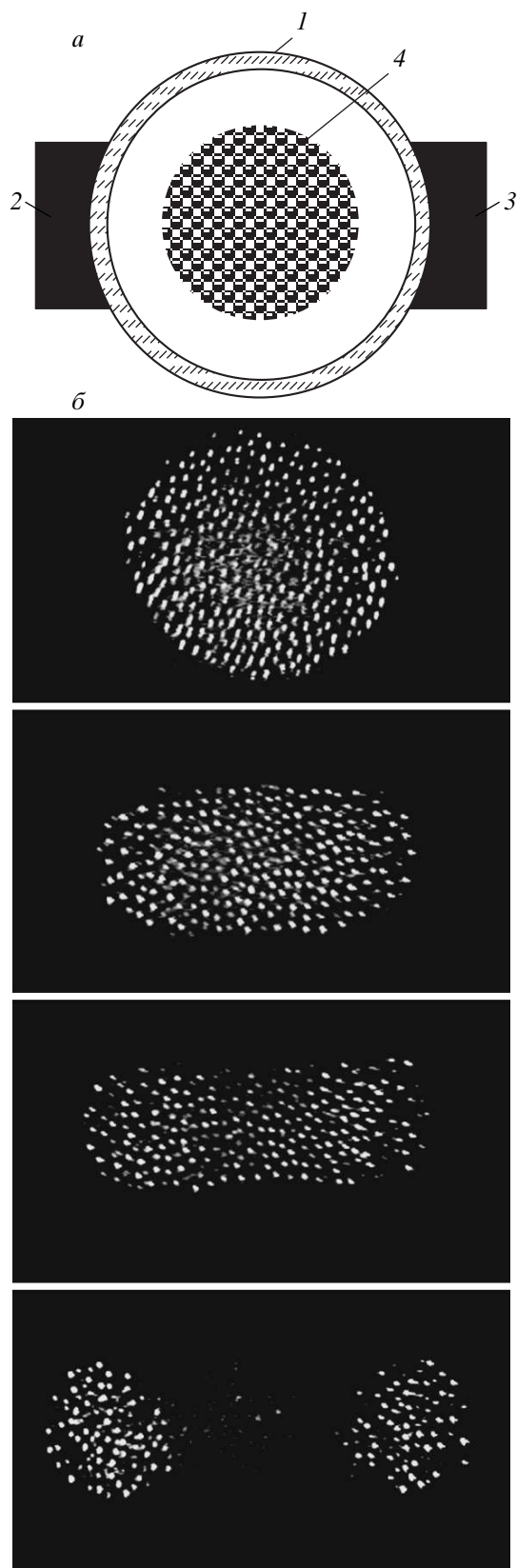
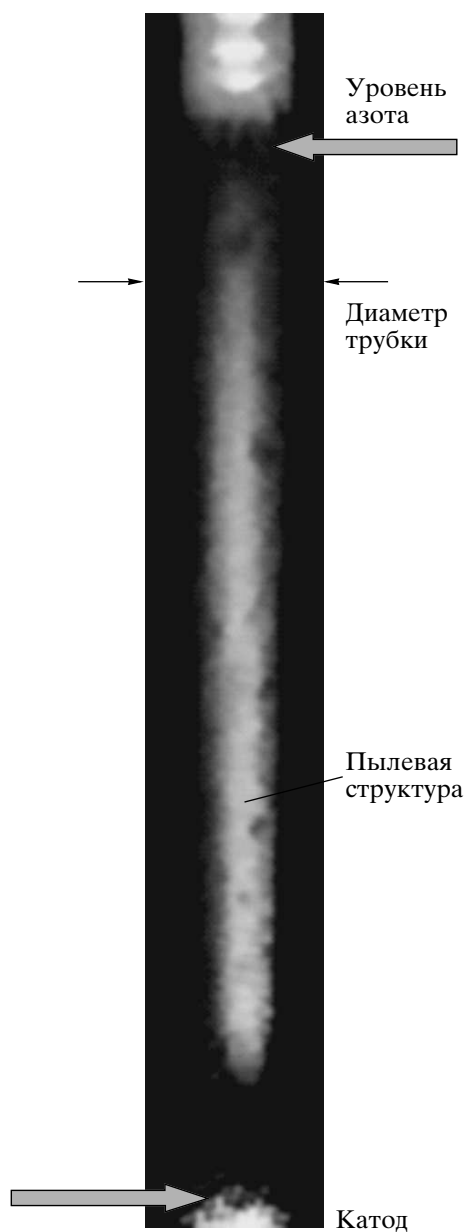
трубки. Кроме того, как показывает анализ экспериментальных данных по тлеющему разряду в различных газах [8], напряженность продольного электрического поля недостаточна для компенсации силы тяжести частиц микронных размеров, поэтому пылевые структуры и наблюдаются в стратах или в приэлектродных слоях. Для создания ловушки в продольном направлении необходимы дополнительные градиентные силы. С помощью сил термофореза можно создать электростатическую тепловую ловушку в плазме с продольными градиентами температур нейтрального газа. Охлаждая или нагревая часть разряда, можно получить дополнительные продольные силы, которые будут не только компенсировать силу тяжести, но и запирают частицы в ловушке. Это возможно, если газовая температура вдоль оси симметрии меняется по квадратичному или более резкому закону. Оценки показывают, что для микронных частиц с массой  $10^{-10}$  г в тлеющем разряде в воздухе необходимы продольные градиенты температуры порядка 10 К/см.

Экспериментально удержание пылевых частиц в электростатически-тепловой ловушке наблюдалось в плазме тлеющего разряда в воздухе при его охлаждении до температуры кипения жидкого азота, равной 77 К. Схема эксперимента аналогична схеме в работе [9]. Пылевые структуры из частичек окиси магния диаметром 3–5 мкм, которые вводились сверху со стороны анода, наблюдались в положительном столбе тлеющего разряда низкого давления в кварцевой разрядной трубке диаметром 2 см, погруженной в криостат с жидким азотом. Пылевые структуры наблюдались через продольное оптическое окно в криостате. Протяженная структура длиной до 20 см, состоящая из длинных пылевых нитей, занимающих почти весь объем положительного столба тлеющего разряда, возникает в узком диапазоне давлений 0.04–0.05 Торр. На рис. 1 представлена фотография пылевой структуры длиной 12 см в положительном столбе тлеющего разряда в жидком азоте. Выше уровня жидкого азота вид разряда меняется, столб разряда разбивается на страты. На устойчивость длинной пылевой структуры в криогенной плазме наряду с хорошо известными ранее факторами (форма электростатического потенциала, сила тяжести, сила ионного трения) определяющее влияние оказывают продольные силы термофореза. Эти силы пропорциональны температурным градиентам, они почти на порядок больше силы ионного трения и обусловлены тем, что импульс, передаваемый пылевой частице молекулами, попадающими со стороны более нагретого газа, больше суммарно-

го импульса «холодных» молекул. Пылевая структура оказывается в электростатически-тепловой ловушке, в которой вертикальная устойчивость обеспечивается суммарным воздействием силы продольного электрического поля и сил термофореза. Силы термофореза запирают частицы с двух сторон: у катода и у границы жидкого азота. Они действуют как вниз, по направлению потока тепла сверху из зоны, не занятой жидким азотом, так и вверх, за счет тепловыделения в катодной области. Ранее столь протяженные пылевые структуры в экспериментах никогда не наблюдались.

При понижении давления пылевая структура разбивается на несколько частей длиной 4–5 см. Структура, однако, неустойчива по отношению к продольным низкочастотным возмущениям. Вся протяженная пылевая структура разбивается на поперечные слои с различной плотностью толщиной около 0.7 мм. Скорее всего, к этому может привести возникновение пылезвуковой неустойчивости. Развитие пылезвуковой неустойчивости есть результат общей плазменно-поточковой неустойчивости, когда ионы движутся через заряженную пыль с дрейфовыми скоростями, большими скорости звука в самой пыли. С понижением температуры тяжелых частиц развитие такой неустойчивости облегчается, так как падает скорость пылевого звука [9].

При комнатной температуре были выполнены эксперименты по охлаждению разрядной трубки диаметром 2 см с помощью термоэлементов на эффекте Пельтье. Средняя часть разрядной трубки охлаждалась с двух сторон двумя микрохолодильниками длиной 2.5 см, плотно прилегающими к боковой поверхности трубки. Между микрохолодильниками было два зазора шириной по 8 мм для наблюдения пылевых структур. При давлениях воздуха 0.1–0.5 Торр и токах 0.25–1 мА пылевые структуры сосредоточены в стратах вблизи оси трубки. Охлаждение стенок разрядной трубки на 20 К приводит к тому, что пылевая структура в страте, находящаяся между микрохолодильниками, вытягивается под действием сил термофореза в радиальном направлении. Вначале она превращается в поперечном сечении в эллипс, вытянутый к холодным стенкам, а затем облако из пылевых частиц разделяется на два круга, которые, деформируясь, притягиваются к холодным стенкам (рис. 2). Частицы под действием радиального температурного градиента не уходят на стенки, а удерживаются в новом равновесном состоянии, вследствие того что радиальная электрическая сила, направленная к оси, возрастает с увеличением радиуса. Подбирая температурное



**Рис. 1.** Протяженная пылевая структура в положительном столбе тлеющего разряда при криогенной температуре. Внизу видно прикатодное свечение, вверху — страты, образующиеся выше границы раздела воздух-жидкий азот. Граница жидкого азота и катодное свечение отмечены стрелками

**Рис. 2.** Динамика деления пылевой структуры при охлаждении разрядной трубки с двух сторон: *a* — схема расположения микроохладильников; показан поперечный разрез разрядной трубки; 1 — разрядная трубка, 2 и 3 — микроохладильники, 4 — пылевая структура; *б* — последовательные фотографии пылевой структуры в поперечном сечении разрядной трубки при включении охлаждения; диаметр трубки равен горизонтальному размеру кадра

**Рис. 2.**

поле, можно создать пылевые облака с разными объемными формами. При локальном охлаждении стенок разрядной трубки с помощью микрохолодильников из страт, лежащих ниже на расстоянии 5–6 см, под действием продольного градиента температур в продольном направлении вытягиваются все заряженные пылевые частицы. Они частично уходят на холодные стенки трубки в области холодильников. В стратах, находящихся выше холодильников, частицы остаются. В данном случае продольных сил термофореза хватает, чтобы вытянуть вверх пылевые частицы из электростатических ловушек, которые представляют собой страты. В результате возникает новая ловушка, образованная суперпозицией сил термофореза и продольного электрического поля. С помощью элементов Пельтье, создавая различные тепловые ловушки, можно изменять форму пылевых структур и даже удалять их из разряда.

Таким образом, с помощью сил термофореза можно создать тепловые ловушки в плазме для удержания пылевых частиц. При низких температурах удастся получить протяженные пылевые структуры, нереализуемые в естественных электростатических ловушках в разряде. Используя термоэлементы Пельтье, можно менять форму и объем структуры и даже разделить ее на части. Поскольку термофоретические силы потенциальны,

для построения ловушек можно использовать хорошо разработанную теорию создания электромагнитных ловушек.

## ЛИТЕРАТУРА

1. V. E. Fortov et al., *Phys. Plasmas* **7**, 1374 (2000).
2. В. В. Балабанов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, В. Е. Фортов, *ЖЭТФ* **119**, 86 (2001).
3. G. M. Jellum, J. E. Daugherty, and D. B. Graves, *J. Appl. Phys.* **69**, 6923 (1991).
4. В. Пауль, *УФН* **160**, 109 (1990).
5. R. F. Wuerker and R. V. Lengmuir, *Appl. Phys.* **30**, 342 (1959).
6. W. Neuhauser, M. N. Hohenstett, P. Toschek, and H. Dehmelt, *Phys. Rev. A* **22**, 1137 (1980).
7. В. Н. Цытович, *УФН* **167**, 57 (1997).
8. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, *ТВТ* **38**, 701 (2000).
9. В. Е. Фортов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. С. Зимнухов, А. П. Нефедов, Д. Н. Поляков, *ДАН* **382**, 50 (2002).