UDC 533.9.01

DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-4-19–25

**Р.А. Сыроватка¹, Л.М. Василяк^{1, 2}, В.И. Владимиров¹, Л.В. Депутатова¹,
В.Я. Печеркин¹, В.С. Филинов¹**

Пространственная сепарация частиц в электродинамической ловушке

¹ Объединенный институт высоких температур РАН; Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2;

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет); Россия, Московская обл., 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; syrovatkara@gmail.com

Численным моделированием и экспериментально исследована возможность пространственной сепарации частиц микронного размера в линейной квадрупольной электродинамической ловушке. Численным моделированием исследованы смеси из двух и трех сортов частиц, отличающихся плотностью и размером. Экспериментально пространственная сепарация получена с полидисперсным порошком Al_2O_3 размерами 10–40 мкм. При численном моделировании пространственное разделение по высоте получено как при произвольно заданных зарядах при одинаковом отношении заряда к массе частиц, так и при расчетах с экспериментально измеренными зарядами частиц при их зарядке в коронном разряде.

Ключевые слова: *заряженные частицы, сепарация частиц, электродинамическая ловушка.*

Введение

Разделение полидисперсных порошков по фракциям является актуальной задачей. Монодисперсные порошки используются, например, в фундаментальных исследованиях в области пылевой плазмы [1–4], в PIV методах определения скорости жидкостей и газов [5].

В большом количестве случаев для сепарации частиц применяют центрифуги [6]. Существуют работы, где сепарация частиц достигается за счет диэлектрофореза, фотофореза или оптофореза [7] или же возникает из-за самоорганизации частиц в узлах стоячих акустических волн [8].

В масс-спектрометрии применяют линейные квадрупольные фильтры, вдоль оси которых проходят только ионы определенных масс, поэтому все масс-спектрометры являются устройствами для сепарации в вакуумных условиях. Представляют интерес устройства, в которых можно разделить и длительное время удерживать большое количество заряженных частиц разной массы. Целью данной работы является исследование пространственной сепарации заряженных частиц микронного размера при нормальных условиях в электродинамической линейной квадрупольной ловушке [9].

Квадрупольная ловушка и модель расчета динамики частиц

Электродинамическая ловушка представляет собой совокупность электродов 1–4, на которые подается переменный электрический потенциал (рис. 1) вида $U = U_0 \sin(\omega t)$. В линейной квадрупольной ловушке, изображенной на рис. 1, на оси ловушки установлено два дополнительных электрода 5, на которые подается постоян-

ный электрический потенциал, препятствующий вылету частиц из ловушки. Как известно [10], если заряженная частица находится в высокочастотном электрическом поле $E \sin(\omega t)$, на нее действует сила, направленная в сторону уменьшения напряженности поля:

$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{2m(\omega^2 + v^2)} \nabla E^2(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота. В физике плазмы эта сила носит название силы высокочастотного давления. Следует отметить, что выражение (1) верно, если сила вязкого трения, действующая на частицу, линейно зависит от скорости частицы ($\mathbf{F}_{fr} = -m\nu\mathbf{v}$). В рассматриваемом случае для частицы выполняется закон Стокса ($\mathbf{F}_{fr} = 6\pi\mu r\mathbf{v}$), поэтому $\nu = 6\pi\mu r/m$, где μ – динамическая вязкость, r – радиус частицы. Сила (1) противодействует силе тяжести и обеспечивает левитацию частицы. Она уменьшается с увеличением частоты и, начиная с определенного значения, перестает удерживать частицу в ловушке. Так как удерживающая сила $\mathbf{F} \propto \frac{q^2}{m}$, можно ожидать пространственного разделения частиц с различными значениями заряда и массы. Для проверки этого предположения был проведен численный эксперимент.

Рис. 1. Схема линейной квадрупольной электродинамической ловушки: 1–4 – электроды ловушки, на который подается переменный электрический потенциал, обеспечивающий удержание частиц в радиальном направлении; 5 – электроды, на которые подается постоянный потенциал, обеспечивающий удержание в аксиальном направлении

Для моделирования динамики частиц в электродинамической ловушке использовали систему дифференциальных уравнений движения:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_{trap}(\mathbf{r}_i, t) - 6\pi\eta r \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} + \sum_{j \neq i}^n k \frac{q_j q_i}{r_{ji}^2} \frac{\mathbf{r}_{ji}}{r_{ji}} + m_i \mathbf{g}, \quad (2)$$

где $\mathbf{F}_{trap}(\mathbf{r}_i, t)$ – электрическая сила, действующая на частицу со стороны электрических полей, создаваемых динамическими электродами ловушки, k – коэффициент пропорциональности в законе Кулона, $i = j = 1 \dots n$, n – количество частиц в расчете, $m_i \mathbf{g}$ – сила тяжести. Второй член уравнения (2) отражает силу трения, действующую на маленькие частицы, движущиеся в вязкой среде; третий член учитывает взаимодействие каждой пары частиц.

Как видно из уравнения (1), существенными характеристиками частицы, оказывающими наибольшее влияние на ее динамику в ловушке, являются масса и заряд. Однако, т. к. сила сопротивления пропорциональна радиусу частицы, плотность материала

частицы также имеет значение. Были проведены тестовые расчеты, в которых при увеличении радиуса частицы в пять раз при неизменной массе частица переставала удерживаться в ловушке.

Результаты экспериментов и численного моделирования

Численное моделирование было проведено при разных условиях. На первом этапе для выбранных частиц были заданы различные плотности и заряды, различающиеся в два раза. На рис. 2 представлены результаты моделирования динамики трех сортов частиц с различными значениями q/m , левитирующих в электродинамической ловушке в воздухе при следующих параметрах: $U_\omega = 4,4$ кВ, $f = 50$ Гц, расстояние между динамическими электродами 15 мм, расстояние между торцевыми электродами 50 мм, радиус частиц 9 мкм. Частицы имели различные заряды и массы. Хорошо видно, что частицы удерживаются ниже оси ловушки, причем более тяжелые частицы с тем же зарядом расположены ниже. Результаты этого моделирования показали, что возможна пространственная сепарация частиц как по массе, так и по заряду.

Рис. 2. Расслоение по высоте заряженных частиц с различными значениями q/m . Черные кружки (1): $\rho = 3,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $q = 9 \cdot 10^4$ е, $m = 1,16 \cdot 10^{-11}$ кг; серые квадраты (2): $\rho = 7,6 \cdot 10^3$ кг/м³, $q = 18 \cdot 10^4$ е, $m = 2,32 \cdot 10^{-11}$ кг; серые ромбы (3): $\rho = 7,6 \cdot 10^3$ кг/м³, $q = 9 \cdot 10^4$ е, $m = 2,32 \cdot 10^{-11}$ кг. Динамические электроды ловушки обозначены цифрой 4

Эффект пространственной сепарации пылевых частиц был обнаружен и экспериментально. На рис. 3 представлена фотография квадрупольной электродинамической ловушки, в которую был инжектирован полидисперсный порошок оксида алюминия, предварительно заряженный в коронном разряде. На ней видно, что произошло расслоение пылевого облака на две структуры. Поскольку эти две структуры были разделены в пространстве по высоте, то в эксперименте удалось собрать частицы с каждого слоя на отдельное предметное стекло и определить размеры частиц с помощью микроскопа. Средний размер (диаметр) в нижнем облаке составил 10 мкм, а в верхнем – 3 мкм.

Рис. 3. Пример пространственной сепарации пылевых частиц оксида алюминия в электродинамической ловушке. Горизонтальная линия – электрод ловушки

Наиболее важными параметрами частицы, определяющими её динамику в электродинамической ловушке, являются её заряд и масса. Определение заряда и массы (размера) пылевых частиц, захваченных ловушкой, было проведено нами в работе [11]. Результаты измерений зарядов частиц в положительной и отрицательной короне представлены на рис. 4. Линиями обозначен максимальный заряд, который может получить частица в униполярной среде в электрическом поле с напряженностью 10 и 20 кВ/см [12].

Рис. 4. Заряды на частицах Al_2O_3 , полученные в отрицательной короне (звездочки) и в положительной (квадраты). Линиями обозначен максимальный заряд, который может получить частица в униполярной среде в поле с напряженностью 10 и 20 кВ/см

Зная размеры и заряды частиц, захватываемые ловушкой, можно провести моделирование, соответствующее экспериментальным условиям. Используя данные рис. 4, были выбраны следующие параметры расчета для двух групп частиц разных размеров: для группы 1: радиус $r_1 = 20$ мкм, заряд $q_1 = 10 \cdot 10^5 e$, количество $n_1 = 10$ шт.; для группы 2: $r_2 = 10$ мкм, $q_2 = 3 \cdot 10^5 e$, количество частиц $n_2 = 90$ шт. Плотность частиц для обеих групп была одинаковой и составляла 3990 кг/м^3 . Амплитуда переменного напряжения на электродах ловушки U_0 составляла 2500 В, частота переменного напряжения f была равна 50 Гц. Частицам задавались случайные координаты в диапазоне от $-0,5$ до $0,5$ см по горизонтальной и вертикальной осям, после чего начинался расчет. Спустя время (порядка 10 секунд) пылевая структура приходит в квазистационарное состояние (присутствуют колебания частиц с частотой приложенного напряжения). Результаты моделирования представлены на рис. 5.

Рис. 5. Расслоение пылевого облака на две подсистемы. Крупными точками обозначены частицы группы 1 с меньшими значениями q/m , мелкими – группы 2 (более высокие значения q/m)

Если зарядка частиц происходит в коронном разряде, то величина заряда для частиц более одного микрона определяется в основном ударным механизмом зарядки. В таком случае, пока частица еще не приобрела предельный заряд, существуют силовые линии электрического поля, пересекающие ее поверхность. Ионы, движущиеся вдоль этих силовых линий, попадают на частицу и заряжают ее. В случае такой зарядки максимально возможный заряд определяется площадью поверхности частицы. Поскольку масса частицы пропорциональна ее объему, то для частиц разного размера параметр q/m будет различным и можно будет получить пространственное разделение этих частиц в электродинамической ловушке. Для смесей с дискретной функцией распределения по размерам (как на рис. 5) можно ожидать наличие пространственного промежутка между частицами разных сортов. Для полидисперсных порошков с непрерывной функцией распределения вероятно плавное увеличение размера частиц в пылевой структуре сверху вниз. Следует отметить, что для частиц меньше 0,1 мкм зарядка полностью определяется диффузионным механизмом. В этом случае заряд пропорционален линейному размеру частицы и разница в q/m для частиц разных размеров будет еще более существенной.

Заключение

Экспериментально и численным моделированием показано, что в линейной электродинамической ловушке происходит пространственное разделение частиц микронного размера с разными массами и зарядами. При зарядке частиц в коронном разряде параметр q/m частиц меняется для частиц разного размера, что и обеспечивает их пространственную сепарацию в электродинамической ловушке. В случае смеси нескольких монодисперсных порошков возможно расслоение пылевой структуры на отдельные подсистемы из частиц одного сорта.

Литература

1. Fortov V.E., Khrapak S.A., Khrapak A.G., Molotkov V.I., Petrov O.F. Dusty plasma // Phys. Usp. – 2004. – Vol. 47. – P. 447–92.

2. Fortov V.E., Ivlev A.V., Khrapak S.A., Khrapak A.G., Morfil G.E. Complex (dusty) plasmas: current status, open issues, perspectives // *Phys. Rep.* – 2005. – Vol. 421. – P. 1–103.

3. Vishnyakov V.I. and Dragan G.S. Thermodynamic reasons of agglomeration of dust particles in the thermal dusty plasma // *Condensed Matter Physics.* – 2003. – Vol. 6, № 4 (36). – P. 687–692.

4. Smith B., Hyde T., Matthews L., Reay J., Cook M. and Schmoke J. Phase transitions in a dusty plasma with two distinct particle sizes // *Advances in Space Research.* – 2008. – Vol. 41, № 9. – P. 1510–1513.

5. Glushniyova A.V., Saveliev A.S., Son E.E., Tereshonok D.V. Shock wave-boundary layer interaction on the non-adiabatic ramp surface // *High Temperature.* – 2014. – V. 52, № 2. – P. 220–224.

6. Bert Brouwers. Rotational particle separator: A new method for separating the particles and mists from gases // *Chem. Eng. Technol.* – 1996. – V. 19. – P. 1–10.

7. Евстапов А.А. Физические методы управления движением и разделением микрочастиц в жидких средах. Ч. I. Диэлектрофорез, фотофорез, оптофорез, оптический пинцет // *Научное приборостроение.* – 2005. – Т. 15 (1). – С. 3–20.

8. Guldiken R., Chan Jo M., Gallant N.D., Demirci U., Zhe J. Sheathless Size-Based Acoustic Particle Separation // *Sensors.* – 2012. – V. 12, № 1. – P. 905–922.

9. Vasilyak L.M., Vladimirov V.I., Deputatova L.V., Lapitsky D.S., Molotkov V.I., Pecherkin V.Y., Filinov V.S., Fortov V.E. Coulomb stable structures of charged dust particles in a dynamical trap at atmospheric pressure in air // *New J. Phys.* – 2013. – V. 15. – P. 043047.

10. Демьянцева Н.Г., Кузьмин С.М., Солунин М.А., Солунин С.А., Солунин А.М. О движении заряженных частиц в переменном неоднородном электрическом поле // *ЖТФ.* – 2012. – Т. 82, № 11. – С. 1–10.

11. Syrovatka R.A., Deputatova L.V., Filinov V.S., Lapitsky D.S., Pecherkin V.Y., Vasilyak L.M., Vladimirov V.I. Charge and Mass Measurements of a Dust Particle in the Linear Quadrupole Trap // *Contrib. Plasma Phys.* – 2016. – Vol. 56, № 5. – P. 419–424.

12. Pauthenier M. and Moreau-Hanot M. Spherical particles in an ionised field // *J. Phys. Radium.* – 1932. – Vol. 3. – P. 590–613.

Поступила в редакцию 21 сентября 2019 г.

UDC 533.9.01

DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-4-19–25

Spatial separation of particles in the electrodynamic trap

**R.A.Syrovatka¹, L.M. Vasilyak^{1,2}, V.I. Vladimirov¹, L.V. Deputatova¹,
V.Ya. Pecherkin¹, V.S. Filinov¹**

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13; bd. 2;

² *Moscow Institute of Physics and Technology; Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutsky per. 9, syrovatkara@gmail.com*

Numerical simulation and experimental studies of the spatial separation of the micron-sized particles have been done for a linear quadrupole electrodynamic trap. Numerical simulations were carried out for the mixtures of two and three particle species of different size and masses. Spatial separation was experimentally obtained for the polydisperse Al_2O_3 micron-sized particles of 10–40 μm . In numerical simulations, spatial separation was obtained both for different particle masses and charges providing the same ratio of the particle charge to mass. Calculations for experimentally observed charges of particles in a corona discharge were performed.

Keywords: *charged particles, particle separation, electrodynamic trap.*

Received 21 September, 2019