

УДК 534.014.2

Торцевые эффекты в линейной ловушке Пауля при удалении заряженных частиц микронных размеров из газового потока.

Д.С. Лапицкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)

Введение.

Частицы микронных размеров часто присутствуют в аэрозолях [1,2], в пылевых облаках в космосе [3], в клеточных мембранах. Современные исследования демонстрируют влияние аэрозолей в атмосфере на температуру, качество воздуха и напрямую на глобальное потепление [2,4].

Частицы размером меньше 10 мкм могут проникать в бронхи, а меньше 2.5 мкм – в легочные альвеолы. Потому наличие аэрозолей в воздухе может причинять вред здоровью. Количество аэрозоля в воздухе напрямую зависит от уровня промышленных выбросов и влияет на частоту появления респираторных болезней и аллергии у людей, живущих рядом с промышленными районами. Для очистки воздуха от взвешенных частиц чаще всего применяют устройства, использующие эффект коагуляции.

Захват и удержание заряженных частиц в воздухе может происходить как в постоянном электрическом поле за счет осаждения частиц на электродах, так и в переменном электрическом поле. Движение частицы в переменном электрическом поле можно разделить на две составляющие: быстрые осцилляции под действием переменного поля и медленное движение – дрейф: совершая осцилляции, частица может дрейфовать в некотором определенном направлении и положение, относительно которого частица совершает колебания, со временем может смещаться. В случае квадрупольного переменного поля линейной ловушки Пауля [5] или центрального поля ионной ловушки Пауля [5] дрейф частицы будет направлен соответственно либо к центральной оси ловушки, либо к центральной области ловушки. Таким образом, частица совершает колебания в некоторой потенциальной яме, аналогичной, например, в [6,7].

В данной работе экспериментально изучен процесс бесконтактного удаления частиц оксида алюминия Al_2O_3 из газового потока с помощью комплексного воздействия переменного электрического поля, формируемого ловушкой Пауля, и постоянного электрического поля. Обнаружены и объяснены торцевые эффекты, препятствующие бесконтактному выводу частиц из ловушки.

Экспериментальная установка.

Экспериментальная установка для удаления частиц из газовых потоков располагалась в

газовом тракте прямоугольного сечения размера $S = 6.1 \times 6.6$ см. Общий вид установки показан на рис. 1. Внутри газового тракта располагались: устройство для зарядки частиц 1, устройство для удаления заряженных частиц из газового потока 2, вытяжка для создания газового потока 3 и чистый контейнер 4 для удаленных частиц. Вытяжка 3 располагалась в нижней части газового тракта и представляла собой вентилятор, создававший газовый поток, направленный сверху вниз со скоростью $v_f = 30$ см/с. Верхний торец газового тракта был открыт для инъекции частиц внутрь устройства. Ниже верхнего торца газового тракта располагалось устройство для формирования коронного разряда напряженностью электрического поля $E_c = 7.1$ кВ/см для зарядки пролетающих через него частиц.

Устройство 2 было установлено в прозрачном контейнере с прямоугольным внутренним сечением размером S . В верхней и нижней грани контейнера были проделаны отверстия размера S для прохождения газового потока сверху вниз. Торцы контейнера были закрыты. Внутри устройства 2 были установлены электроды 5 и 6 ловушки Пауля [5], длина электродов была 20 см, диаметр каждого электрода – 4 мм. Электроды расходились друг от друга: расстояние между торцами электродов увеличивалось с 1.8 см у левого торца до 2.8 см у правого. На электроды ловушки подавалось переменное напряжение следующим способом: на электроды 5 подавалось напряжение $U_\omega \sin(\omega t)$, на электроды 6 $-U_\omega \sin(\omega t)$. Амплитуда переменного напряжения в экспериментах варьировалась от $U_\omega = 11$ до 13 кВ, при частотах $f = 100$ и 200 Гц. У левого края устройства 2 внутри контейнера располагался кольцевой электрод 7 диаметром 6.1 см, опоясывающий электроды 5 и 6. К устройству 2 подсоединялся чистый прозрачный контейнер 4, куда попадали частицы после осаждения.

Эксперимент по удалению частиц из газового потока проводился по следующей схеме: частицы инжесктировались в верхний торец газового тракта и, подхваченные газовым потоком, создаваемым вытяжкой, пролетали через устройство для формирования коронного разряда, где они приобретали заряд. После этого они попадали в устройство 2 для их удаления из газового потока в контейнер 4.

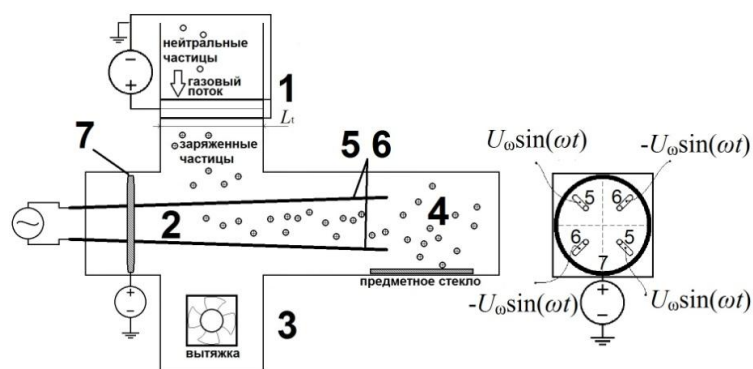


Рис. 1. Схема установки. 1 – устройство для формирования коронного разряда, 2 – устройство для удаления заряженных частиц из газового потока, 3 – вытяжка, 4 – чистый

контейнер, 5 и 6 – электроды ловушки, 7 – кольцевой электрод.

Во время эксперимента в верхний торец установки инжектировался порошок полидисперсных частиц оксида алюминия Al_2O_3 с размерами частиц 0.2-140 мкм и плотностью $\rho_p = 3990 \text{ кг/м}^3$.

Пролетая область коронного разряда, частицы приобретали положительный заряд и попадали в область между электродами 5 и 6, где они захватывались [8] переменным полем электродов. Для вывода захваченных между электродами 5 и 6 частиц из газового потока кольцевому электроду 7 прикладывался положительный потенциал $U_\Delta = 0,5$ и 1 кВ. На рис. 2 представлен процесс вывода частиц из газового потока, электроды ловушки отмечены цифрой 1, цифрой 2 отмечена граница контейнера 4. Частицы, захваченные в газовом потоке за счет переменного поля, выводились из газового потока и направлялись к контейнеру 4, где рядом с торцам ловушки они останавливались, как показано на рис. 2а.

Для объяснения этого эффекта рассмотрим уравнение движения заряженной частицы в линейной ловушке Пауля:

$$m_p \ddot{r} = m_p g + \sum_i F_i(r) + 6\pi\eta r \dot{r} \quad (1)$$

, где m_p масса частицы, \ddot{r} , \dot{r} и r – соответственно ускорение, скорость и вектор частицы, g – ускорение свободного падения, $F_i(r)$ – электрическая сила, действующая на частицу со стороны электрода i , η – динамическая вязкость газа ($\eta = 18 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$), r_p – радиус частицы.

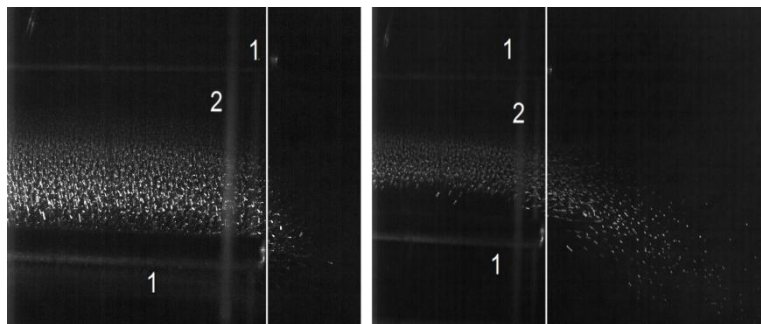


Рис. 2. Процесс удаления частиц из газового потока. 1 – электроды 5 и 6 (рис. 1), 2 – граница установки 2 и контейнера 4 на рис. 1. Вертикальная белая линия соответствует правым торцам электродов 5 и 6. $U_\omega = 9,3 \text{ кВ}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $U_\Delta = 0,5 \text{ кВ}$.

Электрическая сила взаимодействия заряженной частицы с электродом ловушки i может быть представлена как сумма сил Кулоновского взаимодействия точечных зарядов, равномерно распределенных вдоль электрода ловушки [9].

Для расчета эффективной силы, действующей на заряженную частицу, уравнение (1) должно быть решено при начальных условиях $s(r_0, \dot{r}_0)$ в начальный момент времени $t = 0$

и должна быть найдена скорость частицы как функция времени и начальных координат s : $v_p(t, s)$ [10]. Для нахождения скорости частицы $v_p(t, s)$ уравнение (1) решалось методом Рунге-Кутты порядка $N_{rk}=4$.

Рассмотрим кинетическую энергию частицы, движущейся со скоростью $v(t,s)$. Усредненная кинетическая энергия частицы за период колебаний электрического поля

($T=1/f$) представлена следующим уравнением: $\bar{W}(r_0) = \frac{1}{2} m_p \frac{\int_0^T v_p^2(t, s) dt}{T}$, и эффективная сила,

действующая на заряженную частицу, может быть вычислена по формуле, $\bar{F}_{eff} = -\nabla \bar{W}(r_0)$.

Рассмотрим ловушку Пауля [5], представленную на рис. 3 и пренебрежем расхождением электродов.

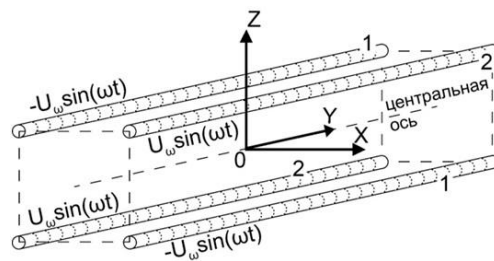


Рис. 3. Схема линейной ловушки Пауля.

Решим уравнение (1) для проекции скорости частицы $v_p(t,s)$ на ось y в предположении, что проекции скоростей на оси x и z равны 0 м/с. При расчетах примем следующие начальные условия: начальная скорость частицы $\dot{r}_0=0$ м/с, а начальное положение частицы r_0 представляло собой смещения Δ : Δ_x , Δ_y и Δ_z от начала координат (точка 0 на рис.3). Расчеты проводились для частицы плотностью $\rho_p = 3990$ г/см³. Заряд частицы и её начальное положение будут показаны на рисунках. Амплитуда переменного напряжения на электродах ловушки при расчетах $U_\omega = 1$ кВ. Величина напряжения влияет только на величину силы увлечения частицы, но не на ее поведение.

Результаты расчетов эффективной силы вдоль оси y представлены на рис.42, ось y направлена слева направо. На рис. 4а приведены зависимости эффективной силы F_{eff} вдоль оси y в зависимости от радиуса частицы r_p . На рис. 4 частица дрейфует под действием эффективной силы влево при отрицательном значении силы и вправо – при положительном. Захват частицы происходит в зоне, где эффективная сила меняет свой знак с положительного на отрицательный.

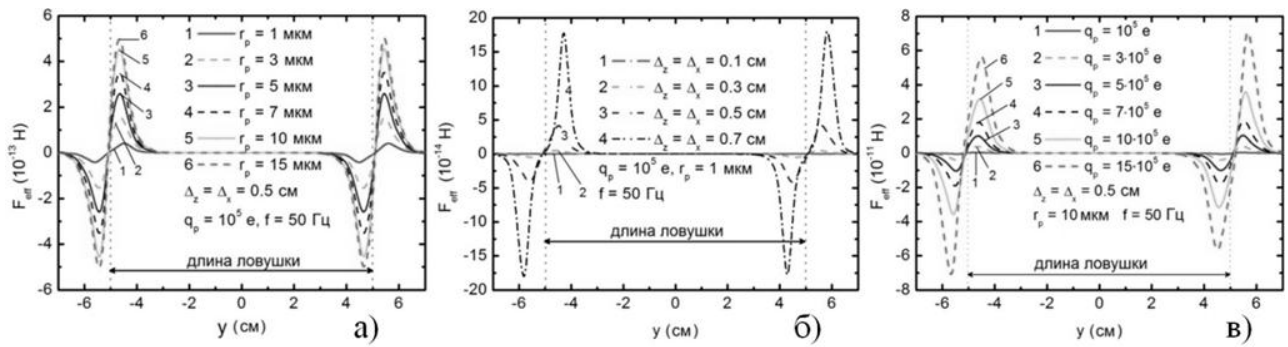


Рис.4. Поведение эффективное силы F_{eff} вдоль оси y в зависимости от а) радиуса частицы r_p , б) начального смещения Δ_x и Δ_z и в) заряда частицы q_p .

На рис. 4а максимальное значение F_{eff} пропорционально радиусу частицы. Так же на рис. 4а зоны положительного и отрицательного значения F_{eff} заходят за границы ловушки, что означает наличие области порядка 1 мм за ловушкой, где возможен захват частиц внутрь ловушки. На рис. 4б показано поведение F_{eff} вдоль оси y в зависимости от начального смещения частицы Δ_x и Δ_z . Чем ближе частица к центрально оси ловушки (рис.1), тем меньше величина F_{eff} из-за того, что максимальные значения напряженности поля спадают при удалении от электродов, суперпозиция электрических полей при приближении центральной оси стремиться к 0 и потому на центральной оси значение F_{eff} равно 0. На рис. 4в показано поведение F_{eff} вдоль оси y в зависимости от начального заряда частицы q_p . Величина заряда частицы влияет только на амплитуду эффективной силы, но не на ее поведение.

Удержание частиц на рис. 2а происходит из-за наличия силы увлечения, которая сдерживает частицы внутри ловушки до тех пор, пока справа не накопится достаточный объемный заряд частиц такой, что кулоновская сила расталкивания частиц не станет выше силы увлечения ловушки. После этого частицы начинают выходить из ловушки, как продемонстрировано на рис. 2б.

Заключение.

Впервые продемонстрирована возможность бесконтактного вывода частиц из газового потока в широком диапазоне размеров частиц. Показано наличие торцевых эффектов у ловушки Пауля, исследована сила увлечения, действующая на заряженную частицу в ловушке.

Работа выполнена при финансовой поддержке ПРОГРАММЫ ПРЕЗИДИУМА РАН «Теплофизика высоких плотностей энергии» (координатор – чл.-корр. РАН Г.И. Канель).

Литература.

1. Spyros N. P., Anthony S. W. and John S. S. Dynamics of Tropospheric Aerosols – J. Phys. Chem. – 1995. – V. 99. – P. 9646.

2. *John H. S. and Spyros N. P.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. – Wiley, 2006. – P. 59.
3. *Bruce T. D.* Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 41(2003) 241– 289.
4. *Pramod Kulkarni, Paul A. B. and Klaus W.* Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications. – Wiley, 2011. – P. 154.
5. *Пауль В.* Электромагнитные ловушки для заряженных и нейтральных частиц. – УФН. – 1990. – Т. 160. – № 12. – С. 109.
6. *D'yachkov L. G.* Coulomb clusters in harmonic traps. – Technical Physics Letters. – 2015. – V. 41. – № 6. – P. 602.
7. *D'yachkov L. G.* A simple analytical model of the Coulomb cluster in a cylindrically symmetric parabolic trap. – High Temperature. – 2015. – V. 53. – P. 613.
8. *Lapitsky D. S., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya.* Confinement of the charged microparticles by alternating electric fields in a gas flow. – EPL. – 2015. – V. 110. – 15001.
9. *Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S. and 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. 43.
10. *Болотовский Б.М., Серов А.В.* Об особенностях движения заряженных нерелятивистских частиц в переменном поле. – УФН. – 1994. – № 164. С. 545.