

В.А. Рунков, П.Е. Суетин, С.А. Береснев

## Электродинамический подвес с плоскопараллельными электродами для исследования аэрозолей

Уральский государственный университет, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 6.02.2002 г.

Представлена оригинальная конструкция электродинамического подвеса (ЭДП) с плоскопараллельными электродами для исследования микрофизических характеристик заряженных частиц. Разработана теория движения микрочастицы в объеме подвеса, получены аналитические выражения для амплитуды колебаний и смещения центра колебаний частицы в зависимости от напряжения на электродах. Теоретически определена граница устойчивости движения частиц различных веществ для ЭДП данной конфигурации. Экспериментальные исследования указанных характеристик хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями. Обнаружена линейная зависимость амплитуды и смещения центра колебаний частицы от величины постоянного напряжения на электродах.

### Введение

Лабораторные исследования микрофизических свойств атмосферных аэрозолей чрезвычайно удобно проводить посредством левитации одиночных (или небольшого коллектива) микрочастиц в измерительной ячейке под действием физических сил различной природы [1]. В частности, особенно перспективно использование данной методики для исследования процессов взаимодействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения с частицами различных веществ в широком диапазоне их размеров (1–100 мкм) при различных давлениях окружающего газа (вплоть до  $10^{-2}$  торр).

Очевидно, что такие экспериментальные условия достаточно полно моделируют поведение аэрозолей на различных высотах в верхней атмосфере в поле солнечного излучения не только по числу Кнудсена, но и по величине дифракционного параметра.

В настоящее время наиболее распространенным способом левитации заряженных микрочастиц является удержание их в объеме электродинамического подвеса (ЭДП), где используется комбинированное действие постоянного и переменного электрических полей. При этом используются различные конфигурации ЭДП – от самых сложных (бигиперболические электроды [2]) до достаточно простых (шаровая полость [3], коаксиальные кольца [4] и др.). Исчерпывающий обзор данного вопроса приведен в [1].

В данной статье приведены описание конструкции и результаты начальных тестовых исследований с аэрозолями для оригинальной конструкции ЭДП с кольцевыми электродами для переменного электрического поля и плоскими дисковыми электродами для постоянного электрического поля. Подвес с такой конфигурацией электродов имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, для него обеспечиваются наилучшие условия наблюдения за движением части-

цы в объеме камеры. Во-вторых, он позволяет осуществлять более обширный набор вертикальных силовых воздействий на микрочастицу по сравнению с подвесами других типов. В-третьих, данная конфигурация электродов допускает достаточно простой расчет напряженностей электрических полей в объеме ЭДП, что необходимо для дальнейшего анализа экспериментальных результатов.

### Описание ЭДП и методика эксперимента

На рис. 1 представлено расположение электродов электродинамического подвеса, а на рис. 2 приведен чертеж экспериментальной установки, в основе которой лежит ЭДП с плоскопараллельными электродами.

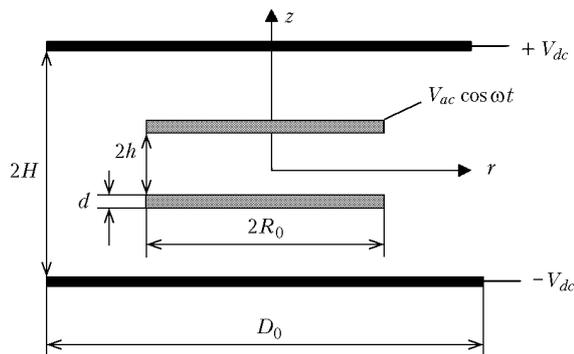


Рис. 1. Расположение электродов в ЭДП с плоскопараллельными электродами

Установка состоит из латунной камеры 1, внутри которой расположены два параллельных медных кольца 4, используемых для создания переменного электрического поля, и два алюминиевых диска 8, при помощи которых создается постоянное электрическое поле.

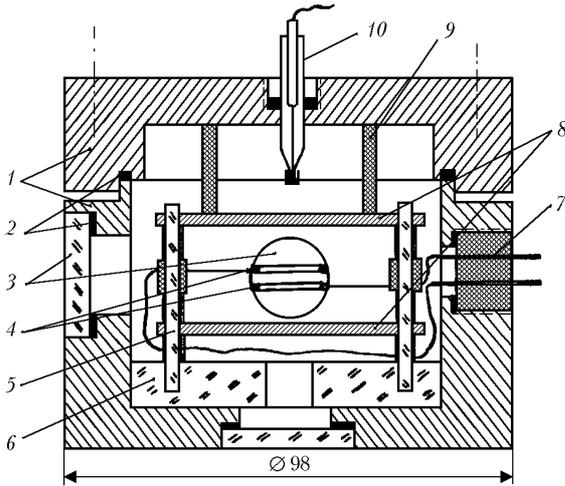


Рис. 2. Рабочая камера экспериментальной установки (вертикальное сечение): 1 – латунный корпус; 2 – резиновые уплотнения; 3 – окна для наблюдения; 4 – кольцевые электроды для создания переменного электрического поля; 5 – стеклянные стойки; 6 – основание ЭДП; 7 – электрические вводы; 8 – концевые электроды (диски) для создания постоянного электрического поля; 9 – нажимная втулка; 10 – ионизатор

Внутренний диаметр камеры равен 98 мм, а ее высота – 80 мм. Кольца изготовлены из медной проволоки толщиной  $d = 1$  мм и радиусом  $R_0 = 6,7$  мм. Диаметр дисков  $D_0 = 60$  мм и толщина 3 мм. Расстояние между кольцами  $2h$  равно 4 мм, расстояние между дисками  $2H$  равно 30 мм.

Камера имеет шесть отверстий, которые используются для ввода частиц, электрических вводов, подсветки измерительного объема, ввода внешнего излучения, вакуумной откачки камеры, наблюдения за частицей. Имеется возможность проведения экспериментов при низких давлениях газа, причем камера может быть откачана вплоть до давлений  $10^{-2}$  торр. В верхней крышке установлен ионизатор 10, предназначенный для зарядки и ввода аэрозольных частиц в камеру. Ионизатор представляет собой стеклянную пипетку, на тонком конце которой закреплен заземленный кольцевой электрод. Внутри пипетки помещается игла, на которую подается высокое отрицательное напряжение ( $-4,5$  кВ). В ионизатор помещается небольшое количество порошка из исследуемых частиц. При приближении иглы к концу пипетки происходит электрический разряд, который обеспечивает зарядку частиц и выброс их в камеру.

Для удержания заряженной частицы внутри ЭДП использовалась следующая методика. Несколько частиц, выйдя из ионизатора, попадали в рабочую камеру. Первоначально на кольцевые электроды подавалось только переменное напряжение. Часть из падающих частиц захватывалась переменным электрическим полем в различных местах между кольцами. Затем, уменьшая величину переменного напряжения, добивались того, чтобы все частицы, кроме одной, оседали на кольцах или на стенках камеры. После этого переменное напряжение увеличивали, и частица занимала положение на оси ЭДП ниже его геометриче-

ского центра. При этом частица совершала колебания вдоль вертикальной оси ЭДП. Подавая постоянное напряжение на диски, можно поместить частицу в центр ЭДП, где она будет длительное время находиться в устойчивом положении при определенной амплитуде переменного напряжения.

## Теория электродинамического подвеса

Чтобы использовать ЭДП для исследования различных физических процессов с атмосферными аэрозолями, необходимо решить задачу о движении заряженной частицы в электрических полях внутри объема подвеса. Уравнение движения достаточно крупной частицы для аксиальной компоненты имеет следующий вид:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + 6\pi\eta R_p \frac{dz}{dt} - qE_{ac} = q[E_{dc} - E_{dc}(0)]. \quad (1)$$

Здесь  $m$  – масса частицы;  $R_p$  – ее радиус;  $\eta$  – динамическая вязкость газа;  $q$  – заряд частицы;  $E_{ac}$ ,  $E_{dc}$  – напряженности переменного и постоянного электрических полей;  $E_{dc}(0)$  – напряженность постоянного электрического поля, обеспечивающего удержание частицы в центре ЭДП, где выполняется условие равенства силы тяжести и электростатической силы:

$$qE_{dc}(0) = mg. \quad (2)$$

Обозначив  $E_{ac} = C_{ac} V_{ac}$ ,  $E_{dc} = C_0 V_{dc}$ ,  $\omega t = \tau$  и учитывая решение уравнения Лапласа для электрических полей в объеме ЭДП, уравнение (1) можно переписать в виде

$$\frac{d^2 z}{d\tau^2} + A \frac{dz}{d\tau} - Bz \cos \tau = D; \quad (3)$$

$$A = \frac{6\pi\eta R_p}{m\omega}, B = \frac{g}{\omega^2} \frac{C_{ac}}{C_0} \frac{V_{ac}}{V_{dc}(0)}, D = \frac{g}{\omega^2} \left[ \frac{V_{dc}}{V_{dc}(0)} - 1 \right], \quad (4)$$

где  $A$  – параметр торможения;  $B$  – параметр электрического поля;  $D$  – параметр внешних воздействий. В (4)  $V_{ac}$ ,  $V_{dc}$  – переменное и постоянное напряжение на электродах;  $V_{dc}(0)$  – постоянное напряжение в центре ЭДП;  $C_{ac}$ ,  $C_0$  – геометрические постоянные, определяемые размерами и формой электродов. Для используемой конфигурации ЭДП  $C_{ac} = 2,00 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ ,  $C_0 = 77,3 \text{ м}^{-1}$ . Геометрическая постоянная  $C_{ac}$  для кольцевых электродов рассчитана по методике [4], а постоянная  $C_0$  вычислена из оценки емкости плоского конденсатора с учетом концевых эффектов [5].

Нелинейное уравнение (3) при  $D = 0$  может быть приведено к уравнению Матье, которое описывает нелинейные процессы в электрических и механических системах. Известно, что при определенных значениях параметров  $A$  и  $B$  решение данного уравнения описывает неустойчивые формы движения частицы в ЭДП [6]. В плоскости параметров  $A$ ,  $B$  существует кривая, называемая границей устойчивости, разделяющая области устойчивого и неустойчивого

движения частицы. Данная кривая является важнейшей характеристикой ЭДП, и ее уравнение в первом приближении имеет вид

$$A^2 = -2 + 2(1 + 2B^2)^{1/2}. \quad (5)$$

При фиксированной частоте переменного электрического поля с увеличением переменного напряжения  $V_{ac}$  достигается точка неустойчивости, при которой происходит резкое возрастание амплитуды колебаний частицы (рис. 3). Величина этого критического напряжения может быть измерена с высокой точностью, что позволяет использовать уравнение (5) для экспериментального определения характеристик ЭДП, а также размера исследуемых частиц.

Если частица выведена из положения равновесия при  $z = 0$  изменением постоянного электрического поля  $V_{dc}$ , то она совершает колебания вдоль вертикальной оси подвеса. При этом амплитуда колебаний, смещения центра колебаний и их фаза могут дать богатую дополнительную информацию о физических характеристиках аэрозольных частиц (об их массе, плотности, заряде и т.д.).

Нелинейное уравнение (3) в общем случае должно решаться численно. Вместе с тем была предпринята попытка получить приближенное аналитическое решение уравнения с помощью метода последовательных приближений Бубнова–Галеркина. В качестве базовых функций для первого приближения метода выбирались  $\sin \tau$  и  $\cos \tau$ . Тогда искомое решение для  $z$  должно иметь вид

$$z = A_0 + a \sin \tau + b \cos \tau, \quad (6)$$

где  $A_0$ ,  $a$  и  $b$  – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению. Подставляя выражение (6) в (3), получаем

$$-a \sin \tau - b \cos \tau + aA \cos \tau - Ab \sin \tau - A_0 B \cos \tau + ab \sin \tau \cos \tau + bB \cos^2 \tau - D = 0. \quad (7)$$

Умножив (7) на базовые функции и интегрируя по полному периоду колебаний, получаем уравнения для определения неизвестных коэффициентов  $a$  и  $b$ :

$$-a - Ab = 0, \quad -b - aA - A_0 B = 0, \quad (8)$$

откуда

$$a = \frac{A_0 B}{1 + A^2}, \quad b = -\frac{A_0 B}{1 + A^2}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что амплитуда колебаний  $A_1$  и их фаза  $\Theta$  равны:

$$A_1 = (a^2 + b^2)^{1/2} = \frac{A_0 B}{(1 + A^2)^{1/2}}, \quad \Theta = \arctg \frac{a}{b} = \arctg(-A). \quad (10)$$

Смещение центра колебаний частицы (сдвиг центра)  $A_0$  может быть найдено из следующих соображений. Запишем выражение (6) в виде

$$z = A_0 + A_1 \cos(\tau - \theta), \quad \sin \theta = \frac{a}{A_1}, \quad \cos \theta = \frac{b}{A_1}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (3) и используя известные тригонометрические формулы, получаем

$$A_0 = (1 + A^2) D / B^2. \quad (12)$$

Формулы (10) и (12) при учете обозначений (4) описывают в первом приближении движение заряженной аэрозольной частицы в ЭДП данной конфигурации и могут быть использованы для экспериментального определения ее характеристик частицы. В [7], где также приведена теория движения частицы в двухкольцевом ЭДП, по-видимому, присутствует ошибка в расчетах или опечатка (результаты отличаются от вышеописанных ровно в два раза).

## Экспериментальные результаты

Изменяя величину и частоту переменного напряжения, а также величину постоянного напряжения в ЭДП, возможно проверить адекватность вышеприведенной теории эксперименту. Ниже кратко приведены основные результаты такого сравнения.

На рис. 3 представлены теоретическая кривая границы устойчивости и экспериментальные значения

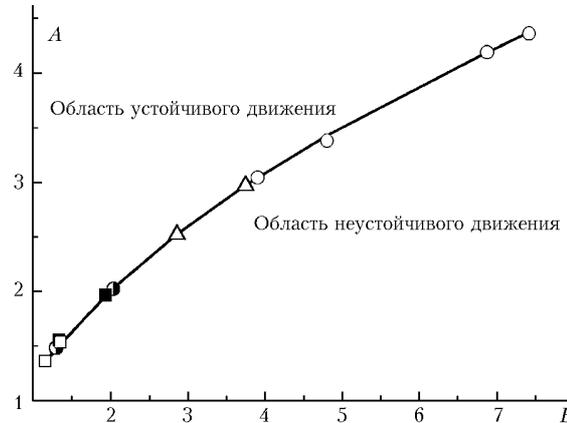


Рис. 3. Диаграмма устойчивости движения частиц в ЭДП (теория и эксперимент):  $\circ$  – частицы ликоподия,  $\Delta$  – никель;  $\square$  – железо;  $\blacksquare$  – титан;  $\bullet$  – медь; кривая – теория

для частиц различных веществ и размеров. Частицы ликоподия, а также частицы никеля, полученные методом взрывной диспергации проволок, имели сферическую форму, что позволило корректно определить их истинный радиус. Для остальных несферических частиц был определен эффективный аэродинамический радиус. Отметим, что наблюдается хорошее согласие экспериментальных данных с теоретической кривой для частиц различных веществ и размеров.

В таблице приведены теоретические и экспериментальные значения параметров  $A_0$ ,  $A_1$  и комплекса  $A_0/A_1$ ,  $A_0/A_1^2$  в зависимости от величины переменного напряжения  $V_{ac}$  для частицы ликоподия.

**Зависимости характеристик колебательного движения частицы ликопидия ( $a = 16,1$  мкм) от напряжения переменного тока  $V_{ac}$  при  $V_{dc}(0) = 29,8$  В,  $f = 50$  Гц**

$V_{ac}$ , В	$A_1$ , мкм (эксперимент)	$A_0$ , мкм (эксперимент)	$(A_0/A_1^2) \cdot 10^4$ , м <sup>-1</sup> (эксперимент)	$(A_0/A_1^2) \cdot 10^4$ , м <sup>-1</sup> (теория)
468	169	514	1,77	1,77
595	140	319	1,67	1,77
738	112	226	1,80	1,77
919	96,1	164	1,77	1,77
1108	85,4	124	1,71	1,77
1203	80,4	94,9	1,53	1,77

Рис. 4 иллюстрирует зависимость отношения  $A_0/A_1$  от значений  $V_{ac}$ . Для всего диапазона экспериментальных значений этой величины видно удовлетворительное согласие с теоретическими предсказаниями.

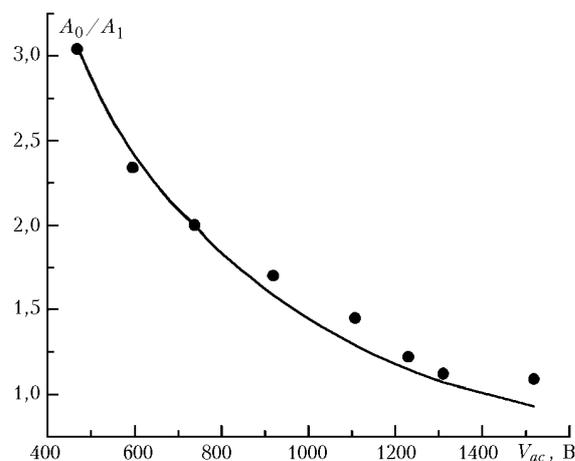


Рис. 4. Зависимость комплекса  $A_0/A_1$  от напряжения переменного тока  $V_{ac}$  для частицы ликопидия ( $a = 16,1$  мкм,  $V_{dc}(0) = 29,8$  В,  $f = 50$  Гц), кривая – теория

На рис. 5 приведены результаты зависимости комплекса  $A_0/A_1^2$  от частоты переменного электрического тока  $f$  при постоянных напряжениях  $V_{ac}$  и  $V_{dc}$  на электродах.

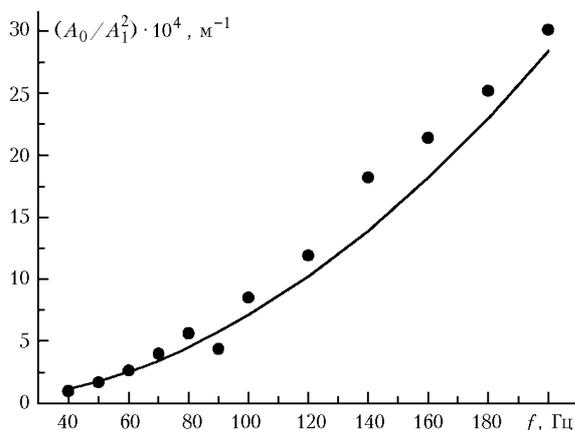


Рис. 5. Зависимость комплекса  $A_0/A_1^2$  от частоты переменного тока  $f$  для частицы ликопидия ( $V_{dc}(0) = 29,8$  В,  $V_{ac} = 1365$  В), кривая – теория

В теории этот комплекс зависит только от частоты переменного напряжения  $f$  и пропорционален ее

квадрату. Эксперимент в пределах погрешности подтверждает этот теоретический вывод. На рис. 6 приведена зависимость амплитуды колебаний  $A_1$  и смещения центра колебаний частицы  $A_0$  от величины постоянного напряжения  $V_{dc}$  при фиксированном значении переменного напряжения  $V_{ac}$ . Видно, что данная зависимость практически линейна, как и предсказывает теория.

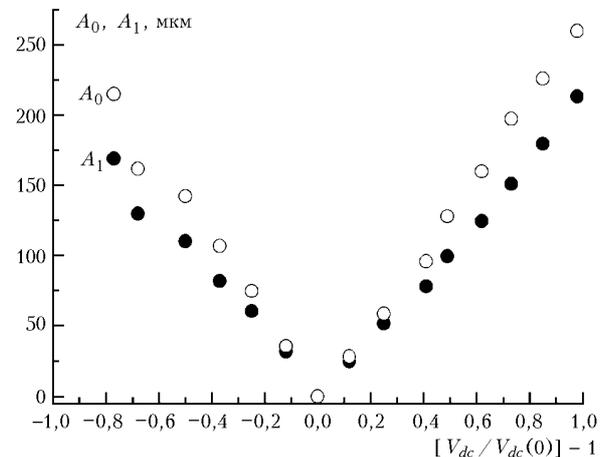


Рис. 6. Зависимость амплитуды  $A_1$  и смещения центра колебаний  $A_0$  частицы ликопидия от напряжения постоянного электрического поля  $V_{dc}$  ( $V_{dc}(0) = 26$  В,  $V_{ac} = 809$  В,  $f = 50$  Гц)

Этот факт может быть использован для измерения сил, действующих на микрочастицу в вертикальном направлении.

## Заключение

В настоящей статье представлена конкретная реализация электродинамического подвеса частиц с двойными плоскопараллельными электродами, который обладает рядом преимуществ перед подвесом, использованным авторами ранее [8] (в частности, обеспечивается более устойчивое удержание частиц в измерительном объеме). Представлена теория ЭДП, включающая в себя расчет электрических полей в объеме подвеса и предсказания для амплитуды колебаний, смещения центра колебаний и фазы колебаний частицы при выводе ее из положения равновесия.

Подобная методика позволяет в рамках одной серии экспериментальных измерений с конкретной частицей одновременно определять целый комплекс ее микрофизических характеристик. Тестовые измерения подтверждают адекватность разработанной теории эксперименту. В дальнейшем данная установка будет использована для экспериментального моделирования динамики атмосферных аэрозолей в поле солнечного излучения на различных высотах верхней атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 01-01-96451) и совместной программы Минобразования и Минобороны Российской Федерации «Научно-инновационное сотрудничество».

1. *Davis E.J.* A history of single aerosol particle levitation // *Aerosol Sci. Technol.* 1997. V. 26. № 3. P. 212–254.
2. *Wuerker R.F., Shelton H., Langmuir R.V.* Electrodynamic containment of charged particles // *J. Appl. Phys.* 1959. V. 30. № 3. P. 342–349.
3. *Arnold S., Folan L.M.* Spherical void electrodynamic levitator // *Rev. Sci. Instrum.* 1987. V. 58. № 9. P. 1732–1736.
4. *Davis E.J., Buehler M.F., Ward T.L.* The double-ring electrodynamic balance for microparticle characterization // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. V. 61. № 4. P. 1281–1288.
5. *Иосель Ю.Я., Козанов Э.С., Струнский М.Г.* Расчет электрической емкости. Л.: Энергоиздат, 1981. 288 с.
6. *Меркин Д.Е.* Введение в теорию устойчивости движения. М.: Наука, 1976. 320 с.
7. *Zheng F., Laucks M.L., Davis E.J.* Aerodynamic particle size measurement by electrodynamic oscillation techniques // *J. Aerosol Sci.* 2000. V. 31. № 10. P. 1173–1185.
8. *Рунков В.А., Суетин П.Е., Береснев С.А.* Исследование свойств атмосферных аэрозолей методом электродинамического подвеса микрочастиц // *Метастабильные состояния и фазовые переходы: Сб. научных трудов Института теплофизики УрО РАН. Вып. 4.* Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. С. 102–113.

*V.A. Runkov, P.E. Suetin, S.A. Beresnev.* **Electrodynamic balance with parallel double-plate and double-ring electrodes for aerosol investigations.**

The original construction of electrodynamic balance (EDB) with parallel double-plate and double-ring electrodes for investigations of microphysical characteristics of charged aerosol particles is presented. The theory of microparticle motion in EDB-volume is designed, and the analytical expressions for a particle oscillation amplitude and displacement of a centre of oscillation are obtained depending on the voltage at electrodes. The motion stability boundary for particles of different substances for given EDB is theoretically determined. The experimental examinations of the indicated EDB-characteristics agree well with theoretical predictions. The linear dependence of amplitude and displacement of a particle oscillation centre from constant voltage at electrodes is detected.