

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

Определение силы сопротивления заряженных микрочастиц методом электродинамического подвеса

Уральский государственный университет, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 17.02.2003 г.

Представлены результаты измерения методом электродинамического подвеса (ЭДП) силы сопротивления частиц ликоподия диаметром 28 мкм в воздухе в диапазоне чисел Кнудсена $0,1 \div 3,0$. Приведено описание устройства ЭДП с плоскопараллельными электродами, использованного в экспериментах, и методики измерений, основанной на регистрации ухода микрочастицы с кривой границы устойчивости. Проведено сравнение полученных результатов с молекулярно-кинетической теорией явления, обнаружено их хорошее согласие во всем исследованном диапазоне чисел Кнудсена при значениях коэффициента аккомодации тангенциального импульса $0,8 \div 1,0$. Обсуждаются вопросы, связанные с броуновским движением исследуемых частиц при пониженных давлениях газа и с влиянием поверхностного заряда частиц на величину силы сопротивления.

Введение

В работе [1] описано лабораторное устройство для исследования микрофизических характеристик аэрозольных частиц — электродинамический подвес (ЭДП) с плоскопараллельными электродами, расположенный в вакуумной камере. Он представляет собой один из возможных вариантов подобных устройств [2] и обладает рядом преимуществ перед ЭДП с другими конфигурациями электродов [1]. В отличие от большинства других реализаций ЭДП, в установке имеется возможность проведения измерений при пониженных давлениях газа и различных интенсивностях падающего на микрочастицы излучения. Данная методика перспективна, в частности, для исследования процессов взаимодействия электромагнитного излучения с частицами различных веществ в широком диапазоне их размеров ($1 - 100$ мкм) при различных давлениях окружающего газа ($0,01 - 760$ торр). Очевидно, что такие экспериментальные возможности в достаточной степени могут моделировать поведение реальных атмосферных аэрозолей на различных высотах (вплоть до $80 - 90$ км) в поле солнечного излучения и уходящего теплового излучения Земли.

Подобного рода моделирование динамических процессов со стратосферным аэрозолем требует подтверждения эффективности и точности предлагаемых методик измерений (в частности, методики достижения границы устойчивости частицы) и достоверности получаемых результатов при использовании конкретной экспериментальной установки. Очевидным «геометрическим» тестом подобного рода является определение размеров (аэродинамических диаметров) исследуемых частиц и сопоставление их с данными оптической микроскопии [3]. В качестве динамического, более чувствительного, теста можно предложить определение силы сопротивления сферических микрочастиц известными свойствами и разме-

ров в широком диапазоне изменения давления окружающего газа. Как будет показано ниже, такого рода результаты выходят за рамки стандартных тестовых измерений и обладают достаточной научной новизной и оригинальностью.

Определение силы сопротивления сферической частицы в потоке газа в зависимости от значений чисел Рейнольдса и Кнудсена является фундаментальной проблемой кинетической теории разреженных газов и механики аэрозолей. На сегодняшний день она исчерпывающе исследована теоретически, что позволяет воспользоваться при сравнении с экспериментом достоверными и высокоточными результатами, полученными в том числе на основе молекулярно-кинетических представлений [4, 5].

Экспериментальные исследования силы сопротивления микрочастиц в широком диапазоне чисел Кнудсена восходят к хорошо известным результатам Милликена (см. обзор [2]) для капелек часового масла в воздухе и других газах. Современные исследования, выполненные по методике ЭДП, в основном посвящены изучению зависимости силы сопротивления частиц от числа Рейнольдса (при фиксированном (малом) значении числа Кнудсена) и определению динамического фактора формы при движении несферических частиц. Здесь следует отметить результаты работы [6], в которой квадратный ЭДП был сопряжен с миниатюрным аэродинамическим соплом для создания ламинарного потока газа, обтекающего микрочастицы. В экспериментах был реализован диапазон чисел Рейнольдса $Re = 0 - 5$, причем результаты измерений очень хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями. Зависимость силы сопротивления от числа Кнудсена не исследовалась, так как измерения проводились при атмосферном давлении (измерительная ячейка не откачивалась), а размеры различных используемых частиц были практически одинаковы.

В работах [7, 8] была предложена новая версия информативной методики определения аэродинамических диаметров частиц, силы сопротивления и других микрофизических параметров для конфигурации ЭДП с двойными кольцевыми электродами, впервые примененная в [9] для других целей. Отметим, что независимо от результатов [7, 8] аналогичная методика была разработана и использована авторами [1]. Она основана на электрических измерениях характеристик постоянного и переменного электромагнитных полей на границе устойчивости движения заряженной частицы (при этом резко возрастает амплитуда ее колебаний, что может быть зафиксировано с высокой точностью). Данный метод получил название метода «прыгающей точки» (springpoint method) [8]. Так как в [7, 8] измерения вновь проводились только при атмосферном давлении, зависимость силы сопротивления частицы от числа Кнудсена не могла быть исследована. В данной работе впервые представлены результаты подобных измерений и проведен их первоначальный анализ.

Методика определения силы сопротивления

Уравнение движения заряженной микрочастицы вдоль оси z в объеме ЭДП (рис. 1) имеет вид

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + F_U(\text{Kn}) \frac{dz}{dt} - qE_{ac} = q[E_{dc} - E_{dc}(0)], \quad (1)$$

где m – масса частицы; η – динамическая вязкость газа; q – заряд частицы; t – время; E_{ac} , E_{dc} – напряженности переменного и постоянного электрических полей в объеме ЭДП; $E_{dc}(0)$ – напряженность постоянного электрического поля, обеспечивающего удержание частицы в центре ЭДП при равенстве силы тяжести и кулоновской силы $qE_{dc}(0) = mg$ (g – ускорение свободного падения); $F_U(\text{Kn})$ – изотермическая сила сопротивления сферической частицы, зависящая от степени разреженности газа (числа Кнудсена $\text{Kn} = l/R_p$, где l – средняя длина свободного пробега молекул газа, определяемая по вязкости газа; R_p – радиус частицы).

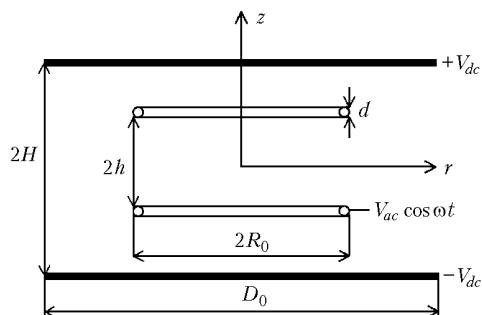


Рис. 1. ЭДП с плоскостными кольцевыми и дисковыми электродами ($d = 1$ мм, $R_0 = 6,7$ мм, медная проволока; $2h = 4$ мм; $2H = 30$ мм; $D_0 = 60$ мм, алюминиевые диски)

Для достаточно крупной частицы при малых значениях числа Re она соответствует закону Стокса, а в других газокинетических режимах рассчитывает-

ся на основе молекулярно-кинетических представлений [4, 5].

Учтя вид решения уравнения Лапласа для потенциала электрических полей в объеме ЭДП данной конфигурации (см., например, [10]), уравнение (1) можно привести к виду уравнения Матье, которое описывает нелинейные колебательные процессы в электрических и механических системах. Указанный формализм подробно описан в [1, 8]. В зависимости от значений параметра вязкостного торможения $A = F_U(\text{Kn})/m\omega$ (ω – круговая частота переменного электрического напряжения) и параметра электрического поля $B = C_{ac}gV_{ac}/C_0\omega^2V_{dc}(0)$ (C_{ac} и C_0 – геометрические постоянные, определяемые размерами и формой электродов), решение уравнения Матье описывает как устойчивые, так и неустойчивые моды движения частицы в объеме ЭДП. Кривая, разделяющая эти области в координатах A, B , называется границей устойчивости и является важнейшей характеристикой ЭДП любого типа. Впервые приближенное уравнение данной кривой для используемой конфигурации электродов было получено в [11].

В работе [1] приближенное аналитическое решение данной задачи было получено методом Бубнова–Галеркина, а также исследовано численно методом конечных разностей. На рис. 2 представлены данные теоретического анализа кривой границы устойчивости, показывающие результаты приближенного решения [11] и численного анализа [1]. Регистрация электрических параметров (напряжений и частот) ухода частицы с данной кривой может быть напрямую использована для получения информации о силе сопротивления.

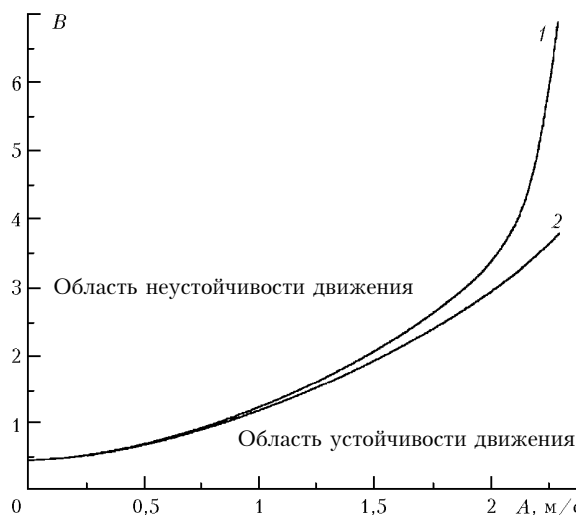


Рис. 2. Кривая границы устойчивости движения частицы в объеме ЭДП: 1 – численное решение методом конечных разностей [1]; 2 – приближенное аналитическое решение [11]

Конкретная методика измерений состояла в следующем. Небольшое количество частиц, получив заряд в ионизаторе, попадало в рабочую камеру (см. схему установки в [1]). На кольцевые электроды при этом подавалось только переменное напряжение V_{ac} . Часть падающих частиц захватывалась переменным электрическим полем в различных областях между

кольцевыми электродами. Затем, уменьшая величину V_{ac} , добивались того, чтобы все частицы, кроме одной, оседали на электродах или стенках камеры. Минимально возможное значение V_{ac} , при котором еще не возникал пробой газа в камере при пониженных давлениях, а частица не уходила из межэлектродной области, составляло около 300 В.

Подбирая и подавая на дисковые электроды постоянное напряжение $V_{dc}(0)$, можно поместить частицу точно в центр ЭДП, где она длительное время может находиться в устойчивом состоянии (т.е. лежать на кривой границы устойчивости) при определенном значении V_{ac} . Изменяя величины V_{ac} и/или ω , можно достичь неустойчивого состояния, при котором происходят интенсивные колебания частицы, т.е. ее движения относительно неподвижного газа в камере. Электрические параметры, соответствующие уходу частицы с кривой границы устойчивости, могут быть измерены с очень высокой точностью. Постепенно откачивая камеру, определяли совокупности значений V_{ac} и ω при фиксированных давлениях газа, соответствующих потере устойчивости движения частицы при различных числах Кнудсена. Давление газа уменьшали до тех пор, пока возрастающая интенсивность броуновского движения частицы еще позволяла проводить подобные измерения. Далее, пользуясь результатами решения уравнения для кривой границы устойчивости, определяли силу сопротивления частицы конкретного вещества и размера при различных давлениях газа.

Обсуждение результатов

В экспериментах использовались достаточно монодисперсные сферические частицы ликоподия (споры папоротника). Их проективные диаметры лежат в диапазоне 20–32 мкм, а плотность (согласно справочным данным) незначительно варьируется: $\rho_p = 0,95 \div 1,24 \text{ г/см}^3$. Порошок ликоподия гигроскопичен, поэтому перед экспериментом частицы подвергались вакуумной сушке; их плотность после этого оценивалась в $1,0 \text{ г/см}^3$. Частицы ликоподия достаточно хорошо подвергаются электрической зарядке в коронном разряде в ионизаторе и несут $(2-5) \cdot 10^5$ элементарных электрических зарядов на поверхности [3]. Точные значения размеров частиц ликоподия определялись непосредственно в проводимом эксперименте также по методике потери устойчивости [1, 3].

На рис. 3 представлены в стандартном виде экспериментальные результаты для приведенной силы сопротивления F_U^* для частицы ликоподия в воздухе и теоретические предсказания в зависимости от числа Кн. Здесь

$$F_U^* = F_U(\text{Кн}) / F_U^{fm}, \quad (2)$$

где свободномолекулярное значение силы сопротивления при полной аккомодации импульса и энергии молекул газа на поверхности частицы [5] определяется как

$$F_U^{fm} = \frac{16\sqrt{\pi}}{3} \left(1 + \frac{\pi}{8}\right) R_p^2 p_\infty \sqrt{\frac{M}{2RT_\infty}} U_\infty, \quad (3)$$

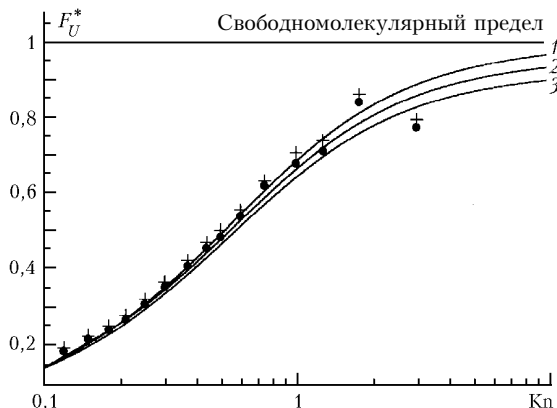


Рис. 3. Приведенная сила сопротивления F_U^* для частицы ликоподия с $R_p = 13,9 \text{ мкм}$ в воздухе в зависимости от числа Кнудсена: точки – эксперимент с расчетом границы устойчивости методом конечных разностей [1]; крестики – эксперимент с приближенным расчетом границы устойчивости по результатам [11]; 1 – теория [5] при $\alpha_\tau = 1,0$; 2 – теория при $\alpha_\tau = 0,9$; 3 – теория при $\alpha_\tau = 0,8$

где M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; p_∞ – давление газа; T_∞ – температура газа; U_∞ – скорость набегающего потока газа; индекс ∞ соответствует состоянию газа на достаточном удалении от частицы. Аппроксимирующая численные расчеты с погрешностью не более 1% во всем диапазоне чисел Кн формула (кривые 1–3) имеет вид [5]:

$$F_U^*(\text{Кн}) = \frac{\text{Кн}}{\text{Кн} + 0,619} \left(1 + \frac{0,310\text{Кн}}{\text{Кн}^2 + 1,152\text{Кн} + 0,785}\right) \times \frac{1 - (1 - \alpha_\tau) \left(1 - \frac{0,641\text{Кн}}{\text{Кн} + 0,158}\right)}{1 - (1 - \alpha_\tau) \left(1 - \frac{\text{Кн}}{\text{Кн} + 0,168}\right)}, \quad (4)$$

где α_τ – коэффициент аккомодации тангенциального импульса, известные значения которого для так называемых технических поверхностей (в том числе и аэрозолей) лежат в диапазоне 0,8–1,0. Экспериментальные значения силы сопротивления определялись при использовании как численного решения для кривой границы устойчивости [1], так и приближенного решения [11] с целью сопоставления получаемых результатов.

При малых числах Кнудсена $\text{Кн} \approx 0,1-0,2$ наблюдается незначительное систематическое превышение экспериментальных данных теоретических предсказаний. Этот факт можно объяснить малыми, но конечными значениями числа Re при колебаниях частицы около положения равновесия при давлениях газа, близких к атмосферному. Оценки по формуле Озеена показывают, что данный инерционный эффект заметен уже при $\text{Re} \approx 0,1$. Теоретические результаты для $F_U(\text{Кн})$ традиционно анализируются при условии $\text{Re} \rightarrow 0$ [4, 5]. В промежуточном по числу Кнудсена режиме $\text{Кн} \approx 0,2-1,0$ наблюда-

ется очень хорошее согласие эксперимента и теории при $\alpha_\tau = 0,9 \dots 1,0$; здесь инерционный эффект уже не существует.

Действительно, число Рейнольдса определяется как $Re = 2\rho U_\infty R_p / \eta$. При понижении давления плотность газа ρ уменьшается, а коэффициент вязкости η от давления не зависит, что приводит к уменьшению реализуемых чисел Re . При больших числах Kn и дальнейшем понижении давления газа наблюдается интенсификация броуновского движения частицы, которая существенно затрудняет измерения и понижает их точность. Данная проблема является принципиальной при экспериментальных исследованиях различных явлений при $Kn \geq 5$, ограничивая возможный диапазон моделирования процессов с атмосферным аэрозолем на больших высотах и требуя повышения статистической достоверности получаемых результатов (увеличения числа измерений актов потери устойчивости частицы при фиксированном давлении газа).

Наблюдаемое уменьшение экспериментальных значений силы сопротивления при умеренных и больших числах Kn по сравнению с теорией, по-видимому, не связано с известным эффектом стесненности пространства. Действительно, число Кнудсена, оцененное по характерному размеру измерительной ячейки $Kn_H = l/2H$, где $2H$ – расстояние между дисковыми электродами (см. рис. 1), даже при предельных степенях откачки камеры является достаточно малым ($Kn_H \leq 0,01$), поэтому приближение частицы в бесконечном объеме газа, принятое в теории [4, 5], всегда выполняется с необходимой точностью.

Представляет интерес вопрос о влиянии заряда аэрозольной частицы на значения силы сопротивления, измеряемой по методике ЭДП. При теоретическом описании как силы сопротивления, так и других форетических явлений аэрозольные частицы традиционно полагались незаряженными (авторам не известны результаты другого рода).

В работе [12] было обнаружено неожиданно сильное влияние знака и плотности заряда различных микрочастиц в разных газах на величину термофоретической силы. Этот новый эффект особенно существен для гелия и менее заметен для воздуха. Эксперименты [12] проводились по методике ЭДП с двойными кольцевыми электродами в вакуумной камере при изменении давления газа. Авторы [12] объясняют обнаруженный эффект электростатическим взаимодействием между заряженной частицей и молекулами неполярных газов, использованных в эксперименте. Поляризуемость молекул, по-видимому, достаточно сильно изменяет характеристики их взаимодействия с заряженной поверхностью частицы. Термофорез частиц связан с переносом энергии в газе и описывается такой транспортной характеристикой, как коэффициент теплопроводности. Сила сопротивления обусловлена переносом импульса в газе и характеризуется коэффициентом вязкости, который также может быть чувствительным к поляризационным эффектам [13].

Сопоставление полученных данных с теорией [4, 5] и известными теоретическими результатами других авторов для незаряженных аэрозольных частиц не обнаруживает видимого влияния заряда частицы на силу сопротивления в пределах точности измерений. К аналогичному выводу приводит и анализ хорошо известных экспериментальных данных Милликена (см., например, [2]), где частицы также подвергались зарядке для удержания их в электростатическом левитаторе. Данный вопрос требует дальнейшего анализа и изучения, так как обнаруженный в [12] феномен не связан с действием известных термомагнитных сил (см., например, [14]), объясняемых эффектом Зенфтлебена–Беенаккера [13].

Заключение

В данной работе методом ЭДП микрочастиц впервые измерена зависимость силы сопротивления частицы ликоподия в воздухе в достаточно широком диапазоне изменения числа Кнудсена $Kn = 0,1 \dots 3,0$. Показано, что в эксперименте нет необходимости специально создавать набегающий поток воздуха, так как относительное движение частицы и газа при малых числах Рейнольдса реализуется за счет колебаний частицы при ее уходе с кривой границы устойчивости. Сравнение экспериментальных данных с молекулярно-кинетической теорией явления [4, 5] показывает их хорошее согласие во всем исследованном диапазоне чисел Кнудсена при значениях коэффициента accommodation тангенциального импульса молекул $\alpha_\tau = 0,9 \dots 1,0$.

Проведенные эксперименты также рассматриваются как тестовые динамические измерения, проведенные по методике ЭДП для конкретной экспериментальной установки. Они подтверждают работоспособность и адекватность разработанной методики требованиям моделирования процессов с атмосферным аэрозолем на больших высотах. В дальнейшем данная методика будет использована для экспериментального изучения фотофореза стратосферных аэрозолей в поле солнечного и уходящего теплового излучения Земли [15].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 01-01-96451).

1. Рунков В.А., Суетин П.Е., Береснев С.А. Электродинамический подвес с плоскопараллельными электродами для исследования аэрозолей // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 550–554.
2. Davis E.J. A history of single aerosol particle levitation // Aerosol Sci. Technol. 1997. V. 26. № 3. P. 212–254.
3. 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.
4. Beresnev S.A., Chernyak V.G., Suetin P.E. Motion of a spherical particle in a rarefied gas. Part 1. A liquid particle in its saturated vapour // J. Fluid Mech. 1987. V. 176. P. 295–310.

5. *Beresnev S.A., Chernyak V.G., Fomyagin G.A.* Motion of a spherical particle in a rarefied gas. Part 2. Drag and thermal polarization // *J. Fluid Mech.* 1990. V. 219. P. 405–421.
6. *Davis E.J., Zhang S.H., Fulton J.H., Periasamy R.* Measurement of the aerodynamic drag force on single aerosol particles // *Aerosol Sci. Technol.* 1987. V. 6. P. 273–287.
7. *Göbel G., Wriedt Th., Bauckhage K.* Periodic drag force and particle size measurement in a double ring electrodynamic trap // *Rev. Sci. Instrum.* 1997. V. 68. № 8. P. 3046–3052.
8. *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.
9. *Ataman S., Hanson D.N.* Measurements of charged drops // *Ind. and Eng. Chem. Fundam.* 1969. V. 8. P. 833–836.
10. *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.
11. *Müller A.* Theoretische Untersuchungen über das Verhalten geladener Teilchen in Sattelpunkten elektrischer Wechselfelder // *Ann. Phys.* 1960. 7. Folge. Bd 6. S. 206–220.
12. *Li W., Davis E.J.* The effects of gas and particle properties on thermophoresis // *J. Aerosol Sci.* 1995. V. 26. № 7. P. 1085–1099.
13. *Ферцигер Дж., Капер Г.* Математическая теория процессов переноса в газах. М.: Мир, 1976. 556 с.
14. *Davis L.A.* Thermomagnetic force at low pressures // *J. Chem. Phys.* 1975. V. 62. № 7. P. 2660–2665.
15. *Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б., Рунков В.А., Суетин П.Е., Черемисин А.А.* О возможности фотофоретической левитации частиц в стратосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16. № 1. С. 52–57.

V.A. Runkov, P.E. Suetin, S.A. Beresnev. Measurements of drag force for charged microparticles by the electrodynamic balance method.

The results of drag force measurements by the EDB-method for lycopodium particles with 28 μm diameter in air with the Knudsen numbers ranging from 0.1 to 3.0 are presented. The construction of the EDB with parallel plate electrodes utilized in experiments is described, and the method of measurements based on recordings of microparticle leaving the stability curve is given. The comparison of obtained results with the molecular-kinetic theory for the effect is conducted, and their good agreement in the used range of Knudsen numbers is revealed at tangential momentum accommodation coefficient values of $0.8 \div 1.0$. The problems concerning the Brownian motion of particles at low gas pressures and the influence of a surface particle charge on the drag force are considered.