

УДК 551.52

## **Методика определения аэродинамического диаметра аэрозольных частиц сложной геометрической формы в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,1 до 6,0\***

**В.Л. Истомин<sup>1</sup>, К.П. Куценогий<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск*

E-mail: igil@hydro.nsc.ru

Предложена методика для определения эквивалентного аэродинамического диаметра  $d_{аэ}$  аэрозольных частиц несферической формы при их оседании в поле силы тяжести в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,1 до 6,0. Описан седиментометр и приведены результаты определения  $d_{аэ}$  для частиц порошка из плексигласа, полученные на нем.

**Ключевые слова:** седimentация, аэрозоль, эквивалентный диаметр, скорость, число Рейнольдса, несферические частицы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Движение аэрозольных частиц в атмосфере определяется силой тяжести и действующим на частицу сопротивлением воздуха, а также размером и формой частицы. Жидкие частицы (капли туманов и облаков) имеют сферическую форму, а диаметр капель облаков и туманов в большинстве случаев не превышает 110 мкм. Скорость оседания в поле силы тяжести таких частиц составляет около 35 см/с. Поэтому число Рейнольдса  $Re$ , определяющее отношение значений вязких и инерционных сил, не превышает 6,0.

Скорость седimentации сферических частиц подробно исследована теоретически и экспериментально в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Для сферических частиц при расчете скорости седimentации имеются либо теоретические формулы, либо полуэмпирические соотношения, хорошо описывающие экспериментальные данные. Этот вопрос достаточно подробно проанализирован в [1, 2]. Во многих практических ситуациях, связанных с седimentацией и псевдооживлением сферических частиц, число Рейнольдса (подсчитанное по диаметру частицы) также не превышает 5. В публикациях [1, 2] показано, что в диапазоне чисел

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 3695).

Рейнольдса от 0,1 до 6,0 для сферических частиц скорость седиментации можно описать, используя уравнение ползучего течения, приводящее к формулам Стокса и Осеена. Для частиц более сложной формы (например, частицы антропогенной и природной пыли, пыльных бурь, пыльцы растений, порошкообразных материалов) не существует теоретических моделей для расчета их скорости седиментации, и поэтому они определяются экспериментально [3–6].

При обобщении эмпирического материала вводится параметр, названный эквивалентным аэродинамическим диаметром  $d_{аэ}$  [7–12]. Эквивалентный аэродинамический диаметр равен диаметру сферической частицы с плотностью в  $1,0 \text{ г/см}^3$ , а ее скорость седиментации равна скорости реальной частицы.

#### МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ДЛЯ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПРИ $0,1 < \text{Re} < 6,0$

Для установившегося движения частицы в поле силы тяжести имеем следующие соотношения:

$$mg = F_{\text{сопр}}(\text{Re}), \quad (1)$$

$$\text{Re} = \left( (V_{\text{сед}} d_{аэ}) / \nu \right), \quad (2)$$

где  $\nu = \mu / \rho_v$ .

При движении частицы, когда  $\text{Re} < 0,1$  по закону Стокса сила сопротивления  $F_{\text{сопр}}(\text{Re})$  имеет вид [2]

$$F_{\text{сопр}}(\text{Re}) = F_0 = 3\pi d_{аэ} \mu V_{\text{сед}}, \quad (3)$$

где  $\rho_v$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ ,  $V_{\text{сед}}$  — плотность, динамическая и кинематическая вязкость воздуха, скорость седиментации частицы.

При  $T = 298 \text{ К}$ ,  $p = 1 \text{ атм}$  ( $0,1 \text{ МПа}$ ),  $\mu = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ пуаз}$ ,  $\rho_v = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ ,  $\nu = 0,15 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Из соотношений (1) и (3) для величины эквивалентного аэродинамического диаметра получим

$$d_{аэ}(\text{Стокс}) = \sqrt{\frac{18\mu V_{\text{сед}}}{\rho g}}. \quad (4)$$

Сила сопротивления частицы при движении в интервале  $0,1 < \text{Re} < 6,0$  описывается формулой Осеена [2]

$$F_{\text{сопр}} = F_0 \cdot (1 + 3/8 \text{ Re}). \quad (5)$$

Из соотношений (3), (4), и (5) получим следующее выражение:

$$d_{аэ}(\text{Осеен}) = d_{аэ}(\text{Стокс}) \sqrt{(1 + 3/8 \text{ Re})}, \quad (6)$$

теперь в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,1 до 6,0 для вычисления эквивалентного аэродинамического диаметра частицы по экспериментально измеряемой скорости седиментации получаем следующее уравнение:

$$d_{аэ}^2 - \frac{27}{4} \frac{\mu V_{\text{сед}}^2}{\nu \rho g} d_{аэ} - \frac{18\mu V_{\text{сед}}}{\rho g} = 0, \quad (7)$$

где  $\rho$  — плотность материала частицы.

Обозначим  $d_{\text{аэ}}$  через  $x$  и введем коэффициенты  $b$  и  $c$ . Тогда уравнение (7) переписывается в следующем виде:

$$x^2 + 2bx + c = 0. \quad (8)$$

Здесь

$$b = -\frac{27 \mu V_{\text{сед}}^2}{8 \nu \rho g}, \quad c = -\frac{18 \mu V_{\text{сед}}}{\rho g}. \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что коэффициенты  $b$  и  $c$  зависят от скорости седиментации, которая определяется экспериментально, плотности материала частицы и характеристик окружающей среды. Поэтому, если плотность материала частицы отличается от единицы, при переходе к геометрическому размеру “эквивалентной сферической частицы”  $d_{\text{геом}}$  необходимо внести поправку по следующему соотношению:

$$d_{\text{геом}}/d_{\text{аэ}}/\sqrt{\rho}.$$

Поскольку коэффициенты  $b$  и  $c$  отрицательные, то уравнение (8) имеет единственный корень

$$x_1 = -b - \sqrt{b^2 - c} = -b - b \sqrt{1 - \frac{c}{b^2}}. \quad (10)$$

Существуют различные методики определения скорости седиментации аэрозольных частиц [4–12]. В основе этих методик лежит сепарация частиц либо в поле центробежных сил (центрифуги, циклоны, импакторы), либо в поле силы тяжести (седиментометры). В настоящей работе для измерения скорости седиментации использовался второй метод — седиментометр.

#### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ СЕДИМЕНТАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из двух основных блоков: I — дозирующей системы и II — собственно седиментатора. Дозирующая система является системой импульсного распыления и в свою очередь состоит из ресивера 1, электроконтактного манометра 2 и электроклапана 3, которые позволяют создать газовый импульс необходимых параметров. Дозатор 4, входящий в эту систему, служит для загрузки определенной порции исследуемого мелкодисперсного вещества. Основная часть седиментатора представляет собой цилиндр 5, разделенный заслонкой 6 на две части. Верхняя часть является приемником распыленного вещества, поступающего из дозирующей системы I через сопло 7. Приемник имеет фильтродержатель 8 с установленными на металлической сетке фильтрами типа АФА-ХА-18 для выхода воздуха. Кроме того, эта часть содержит вспомогательную заслонку 9.

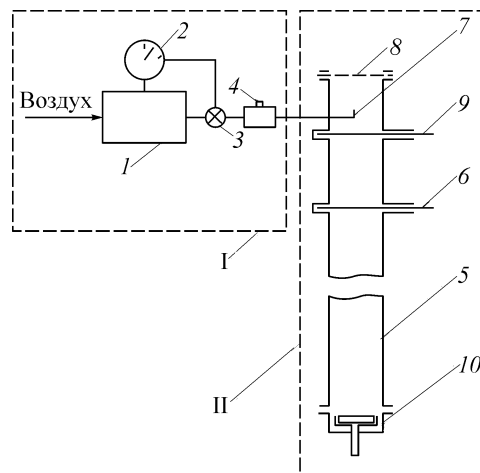


Рис. 1. Схема седиментометра.

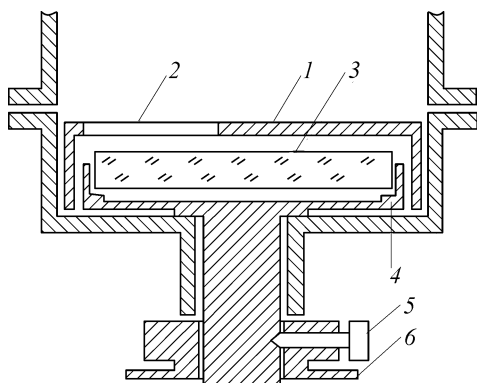


Рис. 2. Устройство для приемки распыляемого вещества.

Нижняя часть цилиндра собственно седиментатора оканчивается устройством 10 (см. рис. 1), содержащим предметное стекло для обзора распыленного мелкодисперсного вещества. Это устройство (рис. 2) представляет собой неподвижную щелевую диафрагму 1 с окном 2, имеющим вид сектора. Ниже находится сменное предметное стекло 3 на вращающемся

ложе 4, которое должно вращаться с переменной скоростью и имеет от одного до пятнадцати фиксированных положений. Вращение стекла на заданный угол осуществляется храповым устройством 5. На рис. 3 представлен общий вид этого устройства и предметного стекла на вращающемся ложе со щелевой диафрагмой.

В экспериментах использовался вертикальный цилиндрический канал внутренним диаметром 80 мм. Длина его нижней части от заслонки 6 (см. рис. 2) до предметного стекла 3 (см. рис. 3) составляла 3080 мм. Объем ресивера составлял  $300 \text{ см}^3$ , начальное давление в нем — 0,5 МПа. Отметим, что высота приемника (от фильтродержателя 8 до заслонки 6, 7, см. рис. 1) значительно (примерно на два порядка) меньше расстояния от заслонки 6 до устройства 10 (см. рис. 1), поэтому ошибка в измерении скорости седиментации незначительна. В установке использовано импульсное распыление на основные элементы, предложенное в работе [3], что позволило в сочетании с блоком II (седиментометром) измерять скорость седиментации как отдельных частиц зерна, так и их агломератов одновременно.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Порция порошка частиц плексигласа массой до нескольких десятков миллиграммов распылялась в верхнюю часть установки при закрытой заслонке 6 (см. рис. 1). В приемной части седиментатора с длиной вертикального канала 3080 мм устанавливалась щелевая диафрагма. В опытах смена щелевой диафрагмы осуществлялась вручную через каждые 5 с, начиная с первой по одиннадцатую. Последняя, одиннадцатая диафрагма в опытах экспонировалась в течение 1 мин. Заслонка 6 открывалась через 10 с после распыления порошка. Сектор 1 служил фоном, контролирующим загрязнение стеклянной пластинки. В настоящих экспериментах предварительные исследования, проведенные при отладке установки, показали, что достаточно использовать одну заслонку 6. Погрешность, связанная с фоновым загрязнением пластин, незначительна, и при обработке экспериментальных данных она не учитывалась.

В процессе эксперимента выполнено несколько опытов. В каждом из них после завершения отбора образцов с осадком стекло с осевшими частицами порошка помещали под микроскоп МБИ-11. Для закрепления частиц на

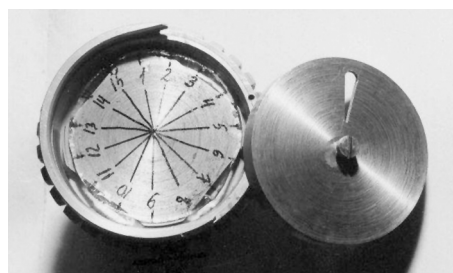


Рис. 3. Предметное стекло на вращающемся ложе.

стекле использовалась специальная липкая смазка. Затем при 77-кратном увеличении для каждого сектора просматривалось около тридцати полей зрения. На каждой из исследуемых площадок подсчитывалось число единичных частиц и число агломератов, содержащих более одной частицы. На рис. 4 показаны частицы порошка различного размера и формы, осевшие в секторах 3–6 стекла.

Из рис. 4 видно, что при распылении порошка плексигласа в осадке присутствуют сферические частицы диаметром от 38 до 130 мкм (верхний ряд), агломераты сферических частиц различного размера (средний ряд) и частицы более сложной формы, возникающие, по-видимому, при деформировании и расколе сферических частиц (нижний ряд). Плотность осадка на седьмом секторе была очень низкой, что связано с фракцией плексигласового порошка, которая предварительно отсеивалась на сите с минимальным размером ячейки, равным 63 мк. Оценки по формулам, приведенным выше, показывают, что в секторах 7–11 должны оседать сферические частицы с геометрическим диаметром менее 64 мкм. Поэтому в таблице приведены результаты расчетов только для первых четырех секторов.

При экспериментах на седиментометре скорость седиментации частиц порошка из плексигласа определялась по осадку частиц в четырех секторах. Диапазоны скоростей седиментации частиц на каждом секторе имели следующие значения:

$$\text{сектор 3} \text{ — } V_c = 20,5\text{--}30,8 \text{ см/с}$$

$$(\text{среднее значение } \overline{V_{\text{сед}}} = (V_{c\text{max}} + V_{c\text{min}})/2 = 25,7 \text{ см/с}),$$

$$\text{сектор 4} \text{ — } V_c = 15,4\text{--}20,5 \text{ см/с } (\overline{V_{\text{сед}}} = 17,95 \text{ см/с}),$$

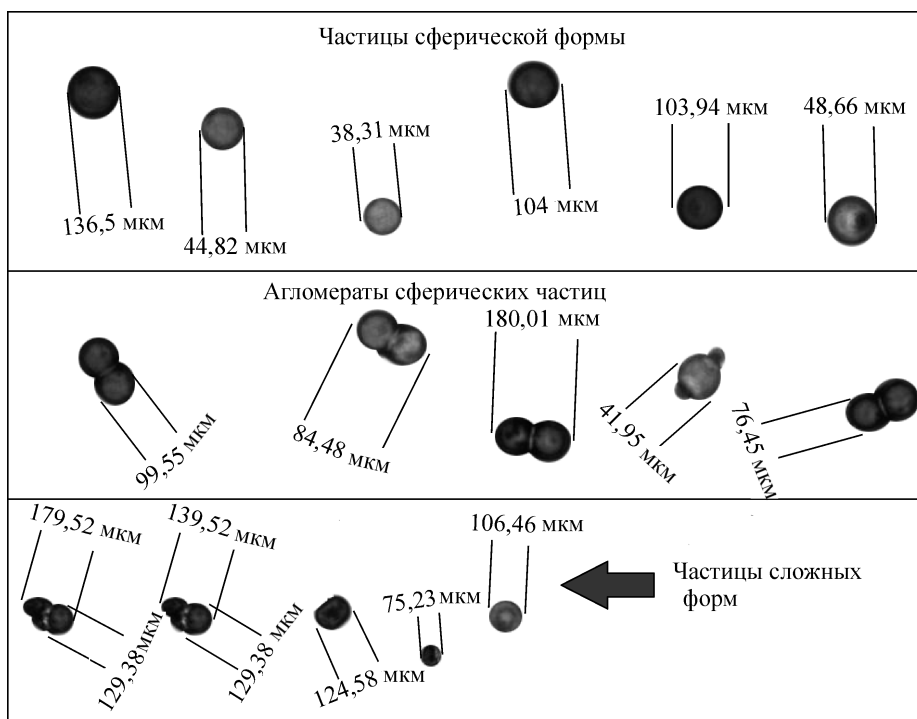


Рис. 4. Фотографии частиц различной формы.

сектор 5 —  $V_c = 12,3-15,4$  см/с ( $\overline{V_{сед}} = 13,85$  см/с),

сектор 6 —  $V_c = 10,3-12,3$  см/с ( $\overline{V_{сед}} = 11,3$  см/с).

Максимальная и минимальная скорости седиментации на каждом секторе рассчитывались по соотношениям:

$$V_{ci}^{\min} = \frac{H}{t_{i+1}}, \quad V_{ci}^{\max} = \frac{H}{t_i}, \quad t_i = 5(i-1), \quad (11)$$

где  $H$  — высота канала (308 см),  $t_i = 5 \cdot (i - 1)$  сек,  $i$  — номер сектора.

В третьем и пятом столбцах таблицы приведены рассчитанные по величинам скоростей седиментации значения чисел Рейнольдса с использованием соотношений (4) и (5) для вычисления эквивалентных аэродинамических диаметров. Эти значения находятся во втором и четвертом столбцах. Из приведенных данных видно, что созданная установка позволяет измерять скорости седиментации аэрозольных частиц в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,44 до 3,1. Уменьшение высоты седиментационной трубы в два раза позволит проводить исследования при числах  $Re \cong 6,0$ .

В столбце  $V_{сед}$  для каждого сектора верхнее значение — минимальная скорость оседания частиц, среднее значение — максимальная скорость, нижнее — средняя скорость оседания частиц на секторе.

Данные, приведенные в таблице, показывают, что диапазон эквивалентных аэродинамических диаметров частиц, оседающих на секторах, изменяется от ~ 10 (сектор 6) до ~ 20 (сектор 3) %. С учетом погрешности ручного переключения положения секторов возможная неопределенность увеличивается на 15–20 %. Поэтому результаты измерения размера сферических частиц порошка, приведенные на рис. 4, находятся в разумном соответствии с данными, рассчитанными по предлагаемой методике. Для проведения дальнейших экспериментальных исследований необходима модернизация существующей установки. Это, прежде всего, изготовление системы автоматического переключения положения секторов с регулированием времени их экспонирования.

Таблица

Оценка диапазона определения эквивалентного аэродинамического диаметра частиц сложной формы седиментометром

№ сектора	$V_{сед}$ , см/с		Re(Сток)	$d_{a3}$ (Сток), мкм	Re(Осеен)	$d_{a3}$ (Осеен), мкм
3	$V_{c \min}$	20,5	1,23	90	1,49	109
	$V_{c \max}$	30,8	2,26	110	3,08	150
	$\overline{V_c}$	25,7	1,73	101	2,23	130
4	$V_{c \min}$	15,4	0,80	78	0,91	89
	$V_{c \max}$	20,5	1,23	90	1,49	109
	$\overline{V_c}$	17,95	1,0	84	1,18	98,5
5	$V_{c \min}$	12,3	0,87	70	0,63	77
	$V_{c \max}$	15,4	0,80	78	0,91	89
	$\overline{V_c}$	13,85	0,68	74	0,77	83
6	$V_{c \min}$	10,3	0,44	64	0,47	69
	$V_{c \max}$	12,3	0,57	70	0,63	77
	$\overline{V_c}$	11,3	0,50	67	0,55	73

## ВЫВОДЫ

1. Предложены методика и установка для определения эквивалентного аэродинамического диаметра аэрозольных частиц в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,1 до 6,0.
2. Проведены предварительные эксперименты на частицах порошка плексигласа, которые подтвердили правильность предложенной методики.
3. Полученные данные позволили сформулировать требования к дальнейшей доработке экспериментальной установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волощук В.М., Седунов Ю.С.** Седimentация и гидродинамическое взаимодействие частиц // Процессы коагуляции в дисперсных системах. Гл. 3. Л.: ГИМИЗ, 1975. С. 58–120.
2. **Хаппель Дж., Бреннер Г.** Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 630 с.
3. **Истомин В.Л., Куценогий К.П.** Определение скорости седиментации спор плауна и их агломератов // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 2. С. 295–301.
4. **Истомин В.Л., Куценогий К.П., Головкин В.В.** Определение скорости седиментации пылевых зерен березы, осины и их агломератов // Теплофизика и аэромеханика, 2004. Т. 11, № 3. С. 635–645.
5. **Куценогий К.П., Истомин В.Л., Головкин В.В.** Определение аэродинамических характеристик пыльцы // Аэрозоли Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 260–282.
6. **Goetz A., Stevenson H.J.R., Preining O.** The design and performance of the aerosol spectrometer // APCA J. 1960. Vol. 10, No. 5. P. 378–383.
7. **Stöber W., Flachbart H.** Size-separating precipitation of aerosols in a spinning spiral dust // Environ. Sci. Technol. 1969. Vol. 3. P. 1280–1296.
8. **Oeseburg F., Roos R.** Improvement of the bearing system of the Stöber aerosol spectrometer // Atmospheric Environment. 1975. No. 9. P. 859–860.
9. **Фукс Н.А.** Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 351 с.
10. **Коузов П.А.** Основа анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия. 1971. 279 с.
11. **Aerosol Measurement.** Principles, Techniques and Applications / Ed. by Paul A. Baron, Klaus Willeke. John Wiley and Sons, Inc. 2001. 1131 p.
12. **Грин Х., Лейн В.** Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия. 1969. 427 с.
13. **Куценогий К.П., Куценогий П.К.** Проблема определения “размера” аэрозольных частиц // Аэрозоли Сибири, Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006. С. 508–518.
14. **Беленко О.А., Куценогий К.П.** Исследование дисперсного состава частиц угольного порошка // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 2. С. 195–198.
15. **Истомин В.Л., Куценогий К.П.** Получение аэрозолей из порошкообразных материалов методом импульсного воздействия газом // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т. 5, № 1. С. 75–79.
16. **Фильтры АФА.** Каталог-справочник. М.: Атомиздат, 1974.

*Статья поступила в редакцию 20 апреля 2009 г.*