

О.А. Беленко¹, К.П. Куценогий²

Исследование дисперсного состава частиц угольного порошка

¹ Сибирская государственная геодезическая академия,
² Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 20.02.2006 г.

Изложена методика измерения «размера» и идентификации формы несферических частиц грубодисперсной фракции атмосферных аэрозолей. Для частиц угольного порошка показано, что спектр размеров эквивалентных диаметров по величине площадей d_s и периметров d_p хорошо аппроксимируется нормальным логарифмическим распределением. Однако параметры распределений (d_{s50} , δ_{g_s}) и (d_{p50} , δ_{g_p}) различны. Это указывает на то, что форма частиц порошка неизомерна. Для «идентификации» формы частиц используется отношение эквивалентных диаметров ($\Delta = d_s/d_p$). Для случая сферической частицы $\Delta = 1$. По отклонению Δ от единицы проведена классификация формы частиц.

Введение

Свойства аэрозольных частиц сильно зависят от их размера и формы [1–3]. Для частицы сферической формы ее размер однозначно определяется одним параметром (радиусом или диаметром). Намного сложнее найти «размер» несферических частиц. В настоящее время наиболее распространенным подходом к решению этой задачи является использование понятия эквивалентный диаметр. По определению, эквивалентным диаметром является диаметр сферической частицы, свойства которой совпадают с характеристиками реальной частицы. Для измерения «размера» несферических частиц с характерным размером более 1–2 мкм широко используется оптическая микроскопия [4], когда получают изображение реальной частицы (плоское или объемное). При плоском изображении легко измерить два параметра, характеризующих «размер» индивидуальной частицы: периметр и площадь. По ним можно рассчитать эквивалентные диаметры частиц:

$$d_s(d_{1\text{экв}}) = \sqrt{4s/\pi} \quad \text{и} \quad d_p(d_{2\text{экв}}) = p/\pi, \quad (1)$$

где $d_{1\text{экв}}$, $d_{2\text{экв}}$ — эквивалентные диаметры частицы по площади и периметру; s и p — измеренные площадь и периметр конкретной частицы.

Для сферической частицы $d_{1\text{экв}} = d_{2\text{экв}}$, а их отношение $\Delta = d_{1\text{экв}}/d_{2\text{экв}}$ равно 1. Отклонение формы частицы от сферической характеризуется параметром $\Delta < 1$.

В данной статье на примере образца угольного порошка анализируется возможность классификации формы несферических частиц по величине параметра Δ .

Подготовка препарата для микросъемки и определение спектра размеров частиц угольного порошка

Образец угольного порошка был предоставлен лабораторией экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики СО РАН. Он получен при дроблении угля в вибромельнице для приготовления водоугольной смеси. Характерные размеры частиц угольного порошка изменялись от 4 до 40 мкм. Для фотографирования порошок напылялся тонким слоем на предметное стекло, покрытое липкой смазкой. Изображения частиц получали на цифровом оптическом микроскопе Axioscop 2 plus. Увеличение подбиралось в зависимости от размера и свойств объекта [5].

Для обработки изображений разработана методика, реализуемая средствами ГИС MapInfo [6], сущность которой состоит в математическом преобразовании цифрового изображения, включающем переход от пиксельной системы в декартову систему координат по изображению тест-объекта с учетом масштаба. После этого в интерактивном режиме с помощью курсора обводятся границы объектов, тем самым фиксируются дискретные значения текущих координат составляющих их точек. Вычисление морфологических характеристик изучаемых объектов (длин отрезков, периметров, площадей) производится с использованием стандартных функций MapInfo.

При последующей статистической обработке результатов по соотношениям (1) вычисляются эквивалентные диаметры по значениям площадей и периметров, а также параметры распределения спектра

размеров периметров и площадей. Значения сохраняются в виде таблиц и экспортируются в Excel. Для морфологической классификации проводится статистическая обработка результатов по подбору параметров распределения частиц по значениям отношений эквивалентных диаметров ($\Delta = d_{1\text{экв}}/d_{2\text{экв}}$). Вычисления проводились следующим образом.

Все измеренные значения площадей s_i и периметров p_i индивидуальных частиц упорядочивались от минимального ($i = 1$) до максимального ($i_{\text{max}} = n$). По значениям s_i и p_i , по соотношениям (1) рассчитывались эквивалентные диаметры d_{1i} и d_{2i} и параметр Δ_i для каждой частицы. Значения параметров Δ также располагались по возрастанию от Δ_{min} до Δ_{max} . Для определения функции распределения величин s , p , $d_{1\text{экв}}$, $d_{2\text{экв}}$ и Δ использовали логарифмически нормальную аппроксимацию в следующем виде [7]:

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-t^2/2} dt; \quad (2)$$

$$t = \ln(x/x_{50})/\sigma, \quad \sigma = \ln \sigma_g, \quad (3)$$

где y – измеренные значения s и p , а также рассчитанные по ним величины d_1 , d_2 и $\Delta = d_1/d_2$; x_{50} – медианные значения x ; σ – среднее квадратическое отклонение $\ln x$; σ_g – изменчивость значения x . Параметры распределения находили методом наименьших квадратов:

$$Y = a + bX, \quad (4)$$

$$Y_i = \Phi^{-1}(y_i), \quad X_i = \ln(n_i/\Sigma n_i), \quad (5)$$

где $\Phi^{-1}(y_i)$ – функция, обратная функции (2); y_i – i -е значение y ; n_i – порядковый номер y_i .

По найденным значениям a и b вычисляются параметры распределения

$$x_{50} = \exp(-a/b), \quad \sigma_g = \exp(1/b). \quad (6)$$

Степень соответствия экспериментальных данных найденному распределению характеризуется коэффициентом корреляции r .

В табл. 1 приведены определенные методом наименьших квадратов параметры распределения x_{50} и σ_g для площади, периметра, эквивалентных диаметров и их отношений, а также коэффициенты корреляции между логнормальной аппроксимацией и экспериментальными данными.

Из табл. 1 видно, что рассматриваемая последовательность размеров частиц достаточно хорошо описывается логарифмически нормальным распределением (коэффициент корреляции выше 0,96). В то же время вычисленные эквивалентные диаметры по из-

меренным площадям и периметрам индивидуальных частиц различаются. Отношение эквивалентных диаметров для всех измеренных частиц меньше 1, следовательно форма частиц угольного порошка отлична от сферической (рис. 1, а) и достаточно разнообразна. Так как спектр размеров измеренных частиц довольно хорошо аппроксимируется логарифмически нормальным распределением, мы сравнили результаты аппроксимации по всем измеренным 110 частицам, разделенным на семь фракций с примерно равным числом частиц в каждой. Результаты определения параметров распределения для эквивалентных диаметров и их отношений при разных способах формирования выборки приведены в табл. 2.

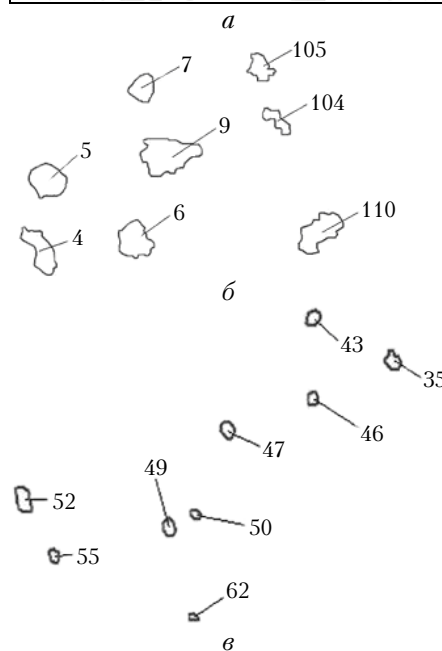
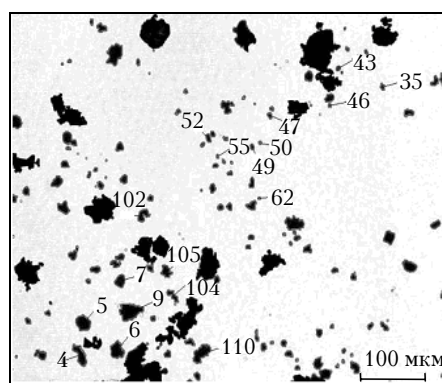


Рис. 1. Микроизображение частиц угольного порошка (а); форма частиц с параметром $\Delta < 0,88$ (б) и $\Delta > 0,88$ (в)

Таблица 1

Параметры распределения площади, периметра, эквивалентных диаметров и их отношений														
s , мкм ²			p , мкм			d_1 , мкм		d_2 , мкм			$\Delta = d_1/d_2$			
s_{50}	σ_{g_s}	r_s	p_{50}	σ_{g_p}	r_p	d_{150}	σ_{g_1}	r_1	d_{250}	σ_{g_2}	r_2	Δ_{50}	σ_{g_Δ}	r_Δ
64,9	2,4	0,98	32,5	1,6	0,98	8,52	1,62	0,99	9,69	1,71	0,99	0,88	1,07	0,96
s_{min}	s_{max}	$s_{\text{max}}/s_{\text{min}}$	p_{min}	p_{max}	$p_{\text{max}}/p_{\text{min}}$	$d_{1\text{min}}$	$d_{1\text{max}}$	$d_{1\text{max}}/d_{1\text{min}}$	$d_{2\text{min}}$	$d_{2\text{max}}$	$d_{2\text{max}}/d_{2\text{min}}$	Δ_{min}	Δ_{max}	$\Delta_{\text{max}}/\Delta_{\text{min}}$
11	595	54	12	111	9	4	28	7	4	36	9	0,76	0,96	1,26

Таблица 2

Параметры распределения при различном методе разбиения выборки									
N	$d_{1экв}, \text{МКМ}$			$d_{2экв}, \text{МКМ}$			Δ		
110	d_{50}	σ_{gd1}	r	d_{50}	σ_{gd2}	r	Δ_{50}	$\sigma_{g\Delta}$	r
	8,52	1,62	0,99	9,69	1,71	0,99	0,88	1,07	0,96
7	$d_{1экв}, \text{МКМ}$			$d_{2экв}, \text{МКМ}$			Δ		
	d_{50}	σ_{gd1}	r	d_{50}	σ_{gd2}	r	Δ_{50}	$\sigma_{g\Delta}$	r
	8,81	1,53	0,99	9,69	1,71	0,99	0,87	1,06	0,96

Для сравнения эти данные для параметра Δ приведены на рис. 2 в графическом виде. На рис. 2, а показана логарифмически нормальная кривая (кривая 1), описывающая всю совокупность 110 измеренных частиц (кривая 2). На рис. 2, б аналогично проведена аппроксимирующая зависимость, построенная при использовании совокупности данных, разбитых на семь размерных фракций. Независимо от способа разбиения экспериментальные точки тесно группируются вокруг прямой линии. Из табл. 2 видно, что параметры прямых на рис. 2, а и б совпадают (одинаковые значения x_{50} , σ_g и r).

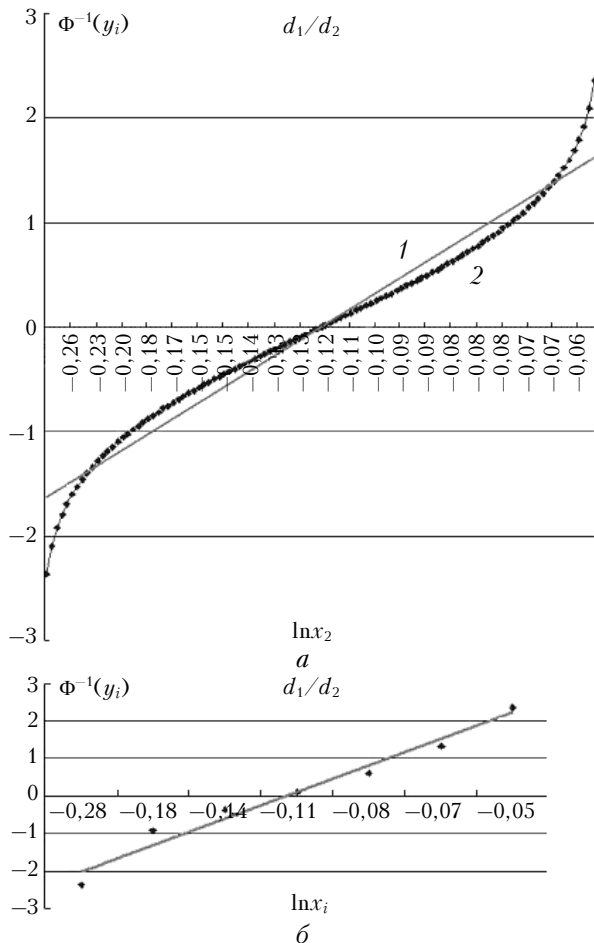


Рис. 2. Аппроксимация логнормального распределения параметра Δ : а — аппроксимирующая зависимость всей совокупности частиц; б — аппроксимирующая зависимость семи размерных фракций

Таким образом, сравнение показало, что величину Δ можно использовать для классификации фор-

мы несферических частиц. Исходя из этого, вся совокупность частиц была разбита на шесть групп. Для каждой группы (фракции) были найдены описанным выше методом параметры логнормального распределения. В табл. 3 приведены результаты этого анализа.

Таблица 3

Параметры логарифмически нормального распределения изменения величин Δ для шести фракций

№ фракции	$\Delta_{\min}/\Delta_{\max}$	n_i	$\Delta_{50}, \text{МКМ}$	$\sigma_{g\Delta}$	r
1	0,76/0,82	19	0,79	1,033	0,98
2	0,83/0,86	18	0,85	1,015	0,97
3	0,87/0,89	18	0,88	1,006	0,98
4	0,89/0,91	18	0,90	1,008	0,98
5	0,91/0,93	18	0,92	1,005	0,98
6	0,93/0,96	19	0,94	1,009	0,97

В первом столбце указан номер группы, во втором — величина изменения Δ каждой из групп, в последних трех — параметры распределения в каждой группе и коэффициент корреляции между экспериментальными значениями и аппроксимирующим их логарифмически нормальным распределением.

Из сравнения табл. 2 и 3 видно, что при разбиении на группы существенно уменьшилось значение σ_g и увеличился коэффициент корреляции. По критерию Стьюдента каждая из выделенных фракций по параметру Δ с высокой вероятностью (критерий Стьюдента между i -й и j -й фракциями $t_{ij} > 1,8$) отличается от другой. На рис. 1, б и в приведены формы индивидуальных частиц, попавших по величине Δ в две группы: 1) $\Delta < 0,88$ и 2) $\Delta > 0,88$. Стрелками указаны номера частиц. В табл. 4 для каждой частицы приведено индивидуальное значение Δ .

Таблица 4

№ частицы	Δ_{50}	№ частицы	Δ_{50}
4	0,82	35	0,94
5	0,77	43	0,92
6	0,86	46	0,94
7	0,82	47	0,89
9	0,78	49	0,92
102	0,80	50	0,91
104	0,82	52	0,88
105	0,85	55	0,91
110	0,76	62	0,93

Из рис. 1, б и в видно, что морфология частиц первой группы достаточно разнообразна. Для второй группы, когда $\Delta > 0,88$, форма частиц близка к сферической. Поэтому можно предположить, что при

$\Delta > 0,9$ частицы сферические. Что касается несферических частиц с $\Delta < 0,8$, то в настоящее время более детальная классификация формы частиц только по величине Δ невозможна.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Спектр размеров несферических частиц угольного порошка хорошо аппроксимируется логарифмически нормальным распределением измеренных площадей s , периметров p , эквивалентных диаметров d_1 и d_2 и их отношений $\Delta = d_1/d_2$.

2. Частицы, для которых $\Delta > 0,9$, близки по морфологическим характеристикам к сферическим частицам.

3. Для несферических частиц, у которых величина $\Delta < 0,9$, однозначно идентифицировать форму частицы только параметром Δ невозможно.

1. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 531 с.
2. Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторх О. Аэрозоли. М.: Атомиздат, 1964, 360 с.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969. 427 с.
4. Федин Л.А., Барский И.Я. Микрофотография. Л.: Наука, 1971. 220 с.
5. Беленко О.А. Компьютерная методика определения размера частиц несферической формы // ГЕО-Сибирь-2005: Сб. матер. науч. конгр. Новосибирск, 2005. Т. 5. С. 156–161.
6. Дюхина Е.И., Беленко О.А. Определение размеров и морфология грубодисперсной фракции аэрозолей на основе компьютерного анализа микронизображений // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 517–520.
7. Колмогоров А.Н. О логарифмически нормальном распределении размеров частиц при дроблении // Докл. АН СССР. 1941. Т. 31. № 2. С. 99–101.

О.А. Belenko, К.Р. Kutsenogii. Dispersion composition of coal powder particles.

The method for measuring the size and identifying the shape of nonspherical particles is reported. It is shown for particles of coal powder that the size range of equivalent diameters for areas d_s and perimeters d_p is well approximated by the lognormal distribution. However, the parameters of distributions (d_{s50} , δ_{gs}) and (d_{p50} , δ_{gp}) are different, which indicates the difference in the shape of powder particles (non-isomorphic shape). Particle shape is identified using the ratio of equivalent diameters. For spherical particles $\Delta = 1$. The particle shape is classified by the Δ deviation from unit.