УДК 543.1/532.135:541.12.015

Н.Д. ОРЛОВА, канд. техн. наук,
Одесская национальная морская академия

О НЕКОТОРЫХ ОЦЕНКАХ РЕЗУЛЬТАТОВ ВИБРАЦИОННОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

В статті пропонуються різни методи вимірювання гранулометричного складу та питомий поверхні металевих порошків після вібраційного подрібнення. Розроблені методики прогнозування показників подрібнення твердих матеріалів .

Different methods of measuring granulational structure and specific surface of metal powder reduced to fragment by vibrating mills of VYPP-200 type are regarded in the article. Certain Direct methods of measuring (such devices as photosygmentograph, etc.) are analized here. Indirect methods of prognostication of results of mental powder produced by vibrational reducing to fragments are also stated in the article.

Широкое применение порошкообразных материалов в производстве композиционных, керамических и строительных материалов требует более полного и точного учета физико-механических свойств порошков, в том числе их дисперсных характеристик. Готовый для дальнейшего использования измельченный материал должен удовлетворять определенным требованиям (иметь определенный гранулометрический состав, насыпной вес, обладать заданной текучестью и определенной формой частиц и т.п.). Поскольку указанные требования достигаются в измельчительном оборудовании за некоторое заранее не известное время, то желательно контролировать, измерять и прогнозировать, хотя бы некоторые из указанных свойств. Методы измерения свойств порошков условно можно разделить на два типа прямые методы и косвенные. К прямым методам относятся ситовой анализ, седиментация и микроанализ. Для определения удельной поверхности дисперсных и пористых материалов наибольшее применение получил предложенный ещё в 1938 году метод БЭТ, названный так по инициалам его авторов (Брунауэр, Эммет, Тейлор). Принцип действия метода БЭТ (многоточечный) основан на динамическом методе тепловой десорбции. Диапазон измерения удельной поверхности по методу БЭТ (многоточечный) составляет $S(t) = 0.5 - 2000\ м^2/г$, относительная погрешность измерения ¢ % ± 6. Приборы ПСХ-J (J=1,2,…9) определяют удельную поверхность в диапазоне $S(t) = 0.03 - 5\ м^2/г$, (300 – 50000 $см^2/г$) и среднемассовый размер частиц порошков. Принцип действия основан на воздухопроницаемости и пористости уплотненного слоя порошка, удельная поверхность $S(t)$ определяется методом Козени-Кармана. Измерение удельной поверхности приборами ПСХ-J и БЭТ, соответствуют европейским (ГОСТ, DIN, ISO) стандартам и американскому стандарту (ASTM).

Наиболее точным методом оценки гранулометрического состава измельченного порошка является микроанализ с использованием электронных микроскопов, фотометрии, счетчиков размеров и формы частиц. Сканирующие фотоседиментографы (типа СФ-2) предназначены для гранулометрического анализа порошков в диапазоне крупности частиц от 2 до 100 мкм. Фотоседиментационный анализ гранулометрического состава порошков основан на фотометрическом определении степени рассеяния света, при пропускании его через суспензию.

Эффективность целого ряда процессов порошковой технологии в различных отраслях промышленности, а также качество конечной продукции в значительной степени зависят от точности определения дисперсности твердых компонентов, что вызывает необходимость совершенствования как устройств для определения гранулометрического состава, так и косвенных (математических) методов. Косвенными будем называть методы определения гранулометрического состава, удельной поверхности или иных свойств измельчаемых порошков без измерения их размеров.

Математические модели. Одной из основных моделей дисперсных систем является математическое описание их гранулометрического состава. Если x размер частицы (в предположении, что частица шар – x радиус шара, или куб – x длина стороны куба), достигаемый в измельчительном агрегате за время t, то количество частиц y размера x является функцией двух переменных $y = f(x,t)$. График такой функции называется кинетической кривой (поверхностью), кинетическая кривая будет статической, если $y = f(x)$. Последняя определяется остатком на сите с ячейкой размера x, для расчета остатка предложено несколько формул [1, 2, 3, 4, 5]. Наиболее полной и характеристикой дисперсных материалов является их дисперсный состав, который выражается интегральной функцией распределения частиц по размерам $y = R(x)$ или кривой полных остатков [2]. В этом случае функция распределения (плотность распределения) $f(x) = R'(x)$ случайной величины x – размер частиц, подчиняется в одних случаях закону распределения Гаусса или логарифмически нормальному закону, а в других различным степенным законам.

Логарифмически нормальный закон [8] весового распределения имеет вид:

$$f(x) = \frac{Ax^{-1}}{\pm\sqrt{2®}} e^{\frac{-\ln^2 \frac{x}{¶}}{2\pm^2}}, \qquad (1)$$

где A– постоянная выбираемая из условия $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$; ¶ – медиана; $\pm^2$ – дисперсия.

Для степенных законов распределения наиболее общая форма записывается в виде [3, 5]:

$$f(x) = Ax^m e^{-\sim x^p}, \qquad (2)$$

где $\sim, m, p$ – параметры, определяющие эксцесс и асимметрию кривой Гаусса.

Отметим, что при $\sim = m = p$ получаем известное уравнение Розина-Раммлера-Беннета (*RRB*). Во всех законах неизвестные параметры распределения идентифицируются по опытным данным.

В области размеров $x \succ 75$ мкм для аналитического описания чаще всего применяется закон [4]:

$$R(x) = \exp\left(-(x/x_1)^n\right) \qquad (3)$$

где n – коэффициент равномерности распределения; $x_1 = x_{0.386}$ – характерный размер частиц, параметры распределения n и, x_1 идентифицируются по опытным данным.

В области размеров $x \prec 75$ мкм с помощью соотношения (3) описать фактическое распределение частиц во всем диапазоне их размеров не удается. В работе [4] рассматривается модификация распределения *RRB* путем введения переменного показателя равномерности:

$$n = P_m(\ln x) \qquad (4)$$

где $P_m(\ln x)$ – полином степени m с коэффициентами $a_{m+1},\ldots, a_1, a_0$ определяются методом наименьших квадратов. С помощью соотношения (4) распределение Розина-Раммлера записывается в обобщенном виде:

$$R(x) = \exp(-\exp(P_{m+1}(\ln x))) \quad (5)$$

Рассчитанные теоретические значения $R(x)$ имеют среднеквадратическое отклонение ± от экспериментальных данных $m = 0, \pm = 0.026$ (рис. 1), при $m = 3, \pm = 0.006$ (рис. 2).

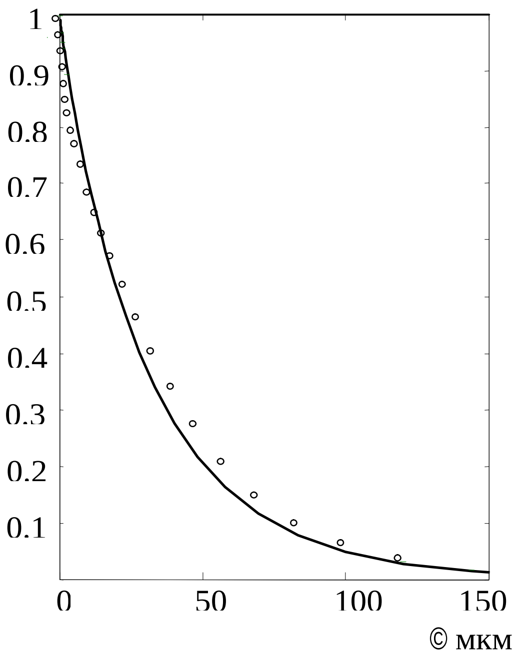

Рис. 1. Кривые полных остатков
$m = 0, P_1 = 0.942 \ln x - 3.228$

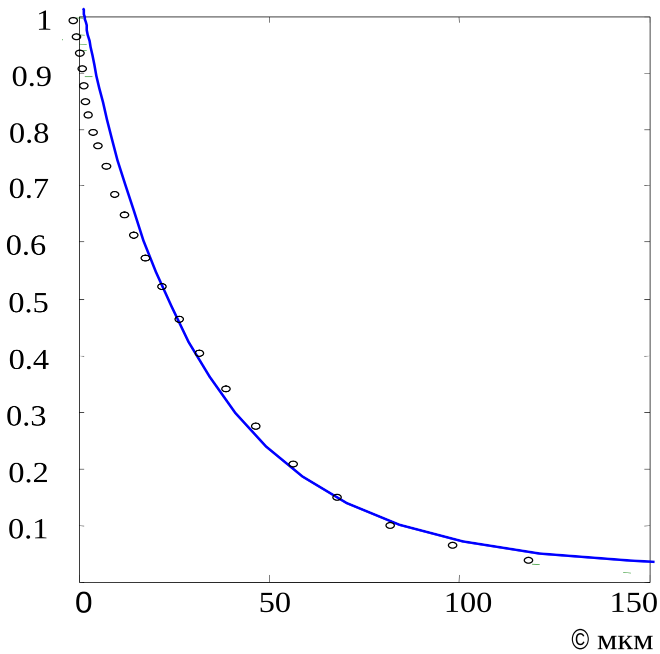

Рис. 2. Кривые полных остатков $m = 3$,
$P_4 = -0.046\ln^4 x + 0.064\ln^3 x - 0.253\ln^2 x + 1.136\ln x - 2.980$
(● – опытные данные,
▬ аналитические зависимости).

Другой математической моделью дисперсных систем является описание их с помощью удельной поверхности. Наиболее распространенная формула для определения удельной поверхности имеет вид:

$$S(t) = \frac{k(t)}{¥(t) \cdot \bar{x}(t)} \quad (6)$$

где $k(t)$ – отношение коэффициентов формы поверхности к форме объёма частицы; $¥(t)$ – насыпной вес; $\bar{x}(t)$ – средний размер частиц в единице веса.

Перечисленные величины изменяются во времени и закон их изменения неизвестен. Поэтому для описания удельной поверхности как функции времени измельчения предложено [3, 5, 6, 7, 8] несколько дифференциальных уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = (\frac{\text{ª}}{3} - \quad \cdot t)S(t); \quad \frac{dS}{dt} = \frac{1}{3}(\text{ª}(1- \quad \cdot t) + \text{«})S(t);$$

$$\frac{dS}{dt} = kS(t)\left[p + (1-p)\frac{S(t)}{S_0} \right]$$

$$\frac{dS}{dt} = (a_0 + a_1 t + a_2 t^2)(b_0 + b_1 S(t) + b_2 S^2(t)). \tag{7}$$

$$\frac{dS}{dt} = \cdot \ _n(t) \cdot P_m(t), \quad \cdot \ _n(t) = \sum_0^n a_i t^i, P_m(t) = \sum_0^m b_i t^i,$$

где – $\text{ª}, \quad , k, p, \text{«}, a_{0,} a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, \cdot \ _n(t), P_m(t)$ – неизвестные параметры, зависящие от физических, химических и механических свойств измельченного металлического порошка и способа измельчения. Значения этих неизвестных параметров, по экспериментальным данным зависимости удельной поверхности от времени, могут быть найдены методом Нелдера-Мида [9] для дифференциальных уравнений. Расчетные данные для некоторых металлических порошков, полученные с помощью метода Нелдера-Мида приведены в таблице.

Таблица

Материал	λ	β	κ	ρ
Х15Н18	$8 \cdot 10^{-2}$	$-1.5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$-50 \cdot 10^{-2}$
Х13М2Ю2	$12.5 \cdot 10^{-2}$	$-1.4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$-53 \cdot 10^{-2}$
Х13М2С2	$6 \cdot 10^{-3}$	$-1.25 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	-52
ПЖ2ОМ	$28 \cdot 10^{-2}$	$-35 \cdot 10^{-2}$	$7.2 \cdot 10^{-2}$	$-18.5 \cdot 10^{-2}$
ПЖ2М2	$-1.9 \cdot 10^{-2}$	$-1.5 \cdot 10^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{-2}$	$-57 \cdot 10^{-2}$
ТН	$5.9 \cdot 10^{-2}$	$-5 \cdot 10^{-5}$	10^{-7}	$\cdot 10^{-7}$
10Р6М5	$6 \cdot 10^{-2}$	$-1.2 \cdot 10^{-5}$	10^{-2}	$-3 \cdot 10^{-3}$
вольфрам	$59 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-8}	10^{-8}
Молибден, вольфрам	$11 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$104 \cdot 10^{-2}$
М2	$7 \cdot 10^{-2}$	$-1.2 \cdot 10^{-5}$	10^{-7}	$\cdot 10^{-7}$

Анализируя табличные данные можно дать рекомендации по выбору определенного типа дифференциальных уравнений, описывающих процесс измельчения металлических порошков.

При расчете параметров измельчения хрупких материалов (Х18Н15, Х13М2Ю2, 10Р6М5) уравнением $\frac{dS}{dt} = (0,03 - 0,014 \cdot t)S(t)$; (значение коэффициентов a, усреднено по табличным данным). Решение полученного уравнения имеет вид $S(t) = S_0 \exp(0.03t - 0.014t^2)$, где S_0 – начальная удельная поверхность измельчаемого материала.

Для пластических порошков типа ПЖ20М, ТН и промежуточных (типа вольфрама, молибдена) этим же уравнением пользоваться нецелесообразно, значение коэффициентов практически равно нулю по принципу значимости.

Для этих порошков возможно использование уравнение вида:

$$\frac{dS}{dt} = (a_0 + a_1 t + a_2 t^2)(b_0 + b_1 S(t) + b_2 S^2(t)),$$

но усреднение коэффициентов для определенного типа (пластических порошков и промежуточных) невозможно, так как коэффициенты имеют различные знаки и порядок значимости внутри одного типа материала.

Вывод. Учитывая особенности экспериментальных кривых удельной поверхности и гранулометрического состава для металлических порошков, установлено что уравнения (1), (2), (5) ,(7) при определенных условиях могут быть использованы для расчета удельной поверхности и гранулометрического состава металлических порошков. Однако следует отметить, что выбор дифференциальных уравнений должен быть связан с методом измерения удельной поверхности, и такие уравнения следует получать из закона Дарси, связывающего скорость течения воздуха (жидкости) через пористую среду (порошок).

Список литературы: **1.** *Гулд Х., Тоболчник Я.* Компьютерное моделирование в физике. М.: Мир, 1990. - 576 с. **2.** *Коузов П.А.* Основы анализа дисперсного состава пылей и измельченных материалов. – Л.: Химия,1987. - 312 с. **3**. *Г.С. Ходаков.* Физика измельчения. М. ”Наука” 1972, с. 307. **4.** *ШапталаВ.В.* Информационная система исследования свойств порошкообразных материалов. **5.** *Овчинников П.Ф.* Общий подход к способам измельчения материалов. Материалы конференции. Технологическое проблемы измельчения и механоактивации. Могилев,21-23 октября 1992г., с.135-146. **6.** *В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арютунов*. Системный анализ процессов химической технологии. М., Наука .1985г., 440 с. **7.** *П.Ф. Овчинников*. Дифференциальные уравнения, описывающие кинетические кривые вибрационного измельчения. Материалы конференции Теория и практика процессов измельчения и разделения. Часть 2.,Одесса 1995г., с.6-13. **8.** *Н.Д. Орлова.* Геометрическое и физическое толкование некоторых математических понятий. Материалы конференции Теория и практика процессов измельчения и разделения. Одесса 2001г., с.159-166. **9**. *Бурденко А.Ф., Орлова Н.Д.* Определение коэффициентов дифференциальных уравнений по экспериментальным данным. Деп. в ВИНИТИ № 3895-В89 от 12.06.89.

Поступила в редколлегию 15.09.07

УДК 621.317.39: 624.131.431.3

Б.Н. ПЕНТЮК, канд. техн. наук, ВНТУ, м. Вінниця
Ю.В. ЧОВНЮК, канд. техн. наук, „ЕКОМЕН”, м. Київ

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ЯВИЩ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ УЩІЛЬНЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ: СТРУКТУРНО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ СТАНУ СЕРЕДОВИЩА ТА МОЖЛИВОСТІ ЕКСПРЕС-ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГОСТІ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

У статті запропоновані математичні та фізико-механічні моделі поляризаційних явищ при взаємодії ущільнюваних матеріалів з електромагнітними полями, які дозволяють здійснювати структурно-інформаційний моніторинг стану середовища та процедуру експрес-визначення вологості дисперсних систем (ДС).

Mathematical, physical and mechanical models of the polarized phenomenon are proposed in this article which arises at the interaction of compressed materials with electromagnetic fields. One may use them for the structural and informational monitoring of the media’s state and for the express determination of the dispersive system’s (DS) moisture content as well.

Постановка проблеми. При аналізі характеру взаємодії робочих органів вібраційних, вібраційно-ударних машин та пресів для ущільнення порошкових матеріалів (ДС) з оброблюваним середовищем й визначенні виникаючих при цьому опорів необхідно знати фізико-механічні властивості останнього. Однією з найважливіших характеристик робочого середовища є його вологість [1]. Фізико-механічний стан та властивості ДС можна оцінити за його