

УДК 532.517.4

А.В. Шваб, П.Н. Зятиков, В.Н. Брендаков, В.К. Никульчиков

МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ УДЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для расчёта эффективности процессов классификации порошкообразных материалов обычно используют результаты анализа гранулометрического состава исходного, крупного и мелкого продуктов разделения. В случае переработки мелкодисперсных и ультрадисперсных порошкообразных материалов проведение такого анализа весьма трудоёмко. Поэтому перспективными являются простые экспресс-методы, позволяющие достаточно быстро осуществлять контроль качества разделения мелкодисперсных порошков.

Ключевые слова: *удельная поверхность, граничный размер, эффективность процесса классификации, кривая разделения, пылегазовый поток, продукты разделения.*

В настоящей работе представлен метод расчёта граничного размера и эффективности процесса классификации на основе известного закона распределения веса частиц по размерам исходного состава порошка, массовых выходов и удельных поверхностей мелкого и исходного продуктов разделения. Возможность и обоснованность такого подхода рассмотрена в работах [1 – 3].

Без нарушения общности процесс классификации может быть рассмотрен на классе непрерывных функций. Положим, что $f_{исх}(\delta)$, $f_1(\delta)$, $f_2(\delta)$ – непрерывные функции плотности распределения счётного числа частиц по размерам исходного, мелкого и крупного продуктов. Тогда для шарообразной формы частиц непрерывные фракции плотности распределения массы по размерам частиц исходного, мелкого и крупного продуктов можно представить в следующем виде:

$$P_{исх}(\delta) = \frac{1}{6} \pi \rho \delta^3 f_{исх}(\delta); P_1(\delta) = \frac{1}{6} \pi \rho \delta^3 f_1(\delta); P_2(\delta) = \frac{1}{6} \pi \rho \delta^3 f_2(\delta), \quad (1)$$

где ρ – плотность, δ – диаметр частиц порошкообразного материала.

Аналогичным образом представляется плотность распределения поверхности частиц по размерам исходного, мелкого и крупного продуктов разделения

$$S_{исх}(\delta) = \pi \delta^2 f_{исх}(\delta); S_1(\delta) = \pi \delta^2 f_1(\delta); S_2(\delta) = \pi \delta^2 f_2(\delta). \quad (2)$$

Введем безразмерный параметр размера частиц в виде

$$x = (\delta - \delta_{\min}) / (\delta_{\max} - \delta_{\min}),$$

где $\delta_{\min}$ и $\delta_{\max}$ – минимальный и максимальный размеры частиц в исходном порошке.

Проводя нормировку функции $p(x)$, получим

$$\int_0^1 p_{исх}(x) dx = 1. \quad (3)$$

Если процесс классификации проходит без измельчения и агрегации частиц, то для произвольного размера частиц может быть записано очевидное равенство

$$p_{исх}(x) = p_1(x) + p_2(x). \quad (4)$$

Тогда массовая доля выхода мелкого продукта α и крупного β может быть представлена в виде

$$\alpha = \frac{\int_0^1 p_1(x) dx}{\int_0^1 p_{исх}(x) dx} = \int_0^1 p_1(x) dx; \quad \beta = \frac{\int_0^1 p_2(x) dx}{\int_0^1 p_{исх}(x) dx} = \int_0^1 p_2(x) dx. \quad (5)$$

Из соотношений (3) – (5) можно получить связь для относительных выходов продуктов разделения $\alpha + \beta = 1$.

На основании [4, 5] значение показателя эффективности классификации E может быть представлено в виде

$$E = 1 - \frac{\int_0^{x_{гр}} (1 - \varphi(x)) p_{исх}(x) dx + \int_{x_{гр}}^1 \varphi(x) p_{исх}(x) dx}{2\alpha\beta}. \quad (6)$$

Здесь $\varphi(x)$ – кривая разделения вида $\varphi(x) = p_1(x) / p_{исх}(x)$, а $x_{гр}$ – значение граничного размера частиц, для которого выполняется соотношения $\varphi(x_{гр}) = 0,5$.

Необходимо отметить, что в практической работе с полидисперсными порошками более удобной и легко определяемой является величина, очень близкая к граничному размеру x^* , которая определяется из соотношения

$$\alpha = \int_0^{x^*} p_{исх}(x) dx, \quad (7)$$

где $x^* = (\delta^* - \delta_{\min}) / (\delta_{\max} - \delta_{\min})$.

Причем, как показывают опытные данные, с достаточной точностью можно положить $\delta^* = \delta_{гр}$. Более того, в тех случаях, когда кривая разделения $\varphi(x) = p_1(x) / p_{исх}(x)$ является немонотонной функцией (рис. 1), появляется неоднозначность в определении граничного размера $\varphi(x_{гр}) = 0,5$, и за его значение целесообразно принимать x^* .

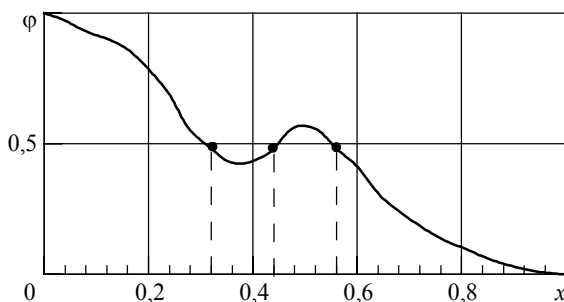


Рис. 1

Согласно определению, значение удельной поверхности исходного состава порошка можно представить в виде

$$J_{\text{исх}} = \frac{\int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \pi \cdot \delta^2 \cdot f_{\text{исх}}(\delta) d\delta}{\int_{\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot \rho \cdot \delta^3 \cdot f_{\text{исх}}(\delta) d\delta}$$

или в безразмерном виде с учетом соотношений (1) – (3) и нормировки функции $p_{\text{исх}}(x)$ получим

$$J_{\text{исх}} = \frac{6}{\rho} \int_0^1 \frac{p_{\text{исх}}(x)}{x} dx.$$

Аналогично, для значений удельных поверхностей мелкого и крупного продуктов разделений получим

$$J_1 = \frac{6}{\rho \cdot \alpha} \int_0^1 \frac{p_1(x)}{x} dx; \quad J_2 = \frac{6}{\rho \cdot \beta} \int_0^1 \frac{p_2(x)}{x} dx. \quad (8)$$

Для того чтобы определить эффективность процесса классификации по известным значениям α , J_1 , J_2 и функции $p_{\text{исх}}(x)$, необходимо, как видно из зависимости (6), смоделировать поведение кривой разделения $\varphi(x)$. При реальном процессе классификации характер поведения кривой $\varphi(x)$ может быть существенно немонотонной функцией. Однако для получения кривой разделения можно использовать монотонную функцию, которая усредняет поведение действительной функции $\varphi(x)$ таким образом, что величина удельной поверхности мелкого продукта совпадает с её опытным значением. И теперь по зависимости (6) можно определить величину показателя эффективности разделения E . Опишем подробнее процесс моделирования функции $\varphi(x)$. По известному закону плотности распределения веса частиц исходного состава, по размеру $p_{\text{исх}}(x)$ и доли массового выхода мелкого продукта α может быть численным способом, на основании соотношения (7), найден граничный размер $x^* = x_{\text{гп}}$. Так как x^* – граничный размер, то, очевидно, можно записать $p_1(x^*) / p_{\text{исх}}(x^*) = \varphi(x^*) = 0,5$.

Учитывая формулы (4) – (6), можно получить зависимости

$$\begin{aligned} \int_0^{x^*} (1 - \varphi(x)) \cdot p_{\text{исх}}(x) dx &= (1 - E) \cdot \alpha \cdot \beta; \\ \int_{x^*}^1 \varphi(x) \cdot p_{\text{исх}}(x) dx &= (1 - E) \cdot \alpha \cdot \beta. \end{aligned} \quad (9)$$

Выберем в качестве кривой разделения функциональную зависимость вида гиперболического тангенса, для случая $0 \leq x \leq x^*$ положим $\varphi(x) = (1 + \text{th}(c_1 \cdot (\frac{1}{2} - x))) / 2$, а для $x^* \leq x \leq 1$ запишем $\varphi(x) = (1 - \text{th}(c_2 \cdot (x - \frac{1}{2}))) / 2$.

После подстановки значений $\varphi(x)$ в соотношения (9) получим трансцендентные уравнения, из которых при заданном наперед значении эффективности классификации могут быть найдены модельные константы c_1 и c_2 .

Таким образом, при заданном значении показателя эффективности получаем совершенно определённую единственную функцию – кривую разделения $\varphi(x)$,

или функцию распределения массы частиц по размерам мелкого продукта, равную $p_1(x) = \varphi(x) \cdot p_{исх}(x)$.

В дальнейшем на основании смоделированной функции $p_1(x)$ может быть определено значение удельной поверхности мелкого продукта разделения по зависимости (8). Таким образом, получается взаимнооднозначное соответствие между показателем эффективности классификации и значением удельной поверхности мелкого продукта. Рассчитывая для ряда значений показателя эффективности E соответствующие значения удельных поверхностей мелкого продукта J_1 , получим функциональную связь $J_1 = J_1(E)$, из которой для заданного значения J_1 (определённого из опыта) находится соответствующая величина показателя эффективности. Для примера на рис. 2 приводится расчётная зависимость эффективности классификации от безразмерного значения удельной поверхности $(J - J_{исх}) / (J_t - J_{исх})$, где J_t – значение удельной поверхности мелкого продукта, рассчитанного по кривой гранулометрического состава. Там же показаны точками экспериментальные значения эффективностей, полученных в результате анализа гранулометрического состава мелкого и исходного продуктов на основании зависимости (6).

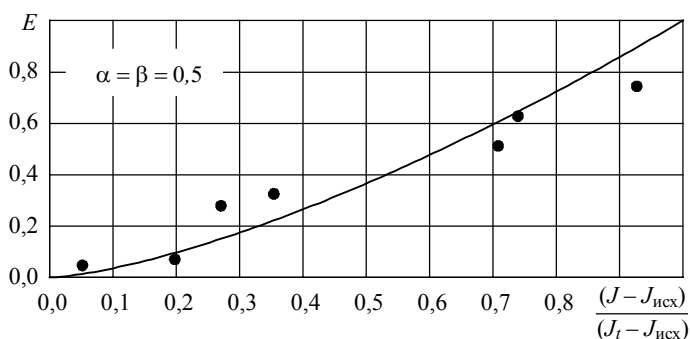


Рис. 2

Для проверки работоспособности построенного метода расчета был создан численный алгоритм расчёта на ЭВМ показателя эффективности E и граничного размера. Численная проверка разработанного метода проводилась следующим образом. По известному определению гранулометрического состава исходного и мелкого продуктов разделения определялось значение эффективности E_t непосредственно по зависимости (6). Кроме того, по распределению гранулометрического состава мелкого и крупного продуктов могут быть найдены значения удельных поверхностей J_1 , $J_{исх}$ по зависимостям (8). Таким образом, на основании предложенного метода, но с использованием известных значений удельных поверхностей J_1 , $J_{исх}$ также определялось значение эффективности E .

В качестве иллюстрации на рис. 3 и 4 приведено сопоставление опытных кривых распределений массы частиц по размерам продуктов разделения (•) с результатами смоделированных кривых, полученных на основе предложенного метода.

Необходимость получения опытного значения удельной поверхности J_1 в рассматриваемом методе связана с тем, что в реальном процессе форма частиц порошкообразных материалов часто отличается от шарообразной, поэтому, чтобы скорректировать расчёты, необходимо найти коэффициент, учитывающий отклонение значений удельных поверхностей реальных и шарообразных частиц.

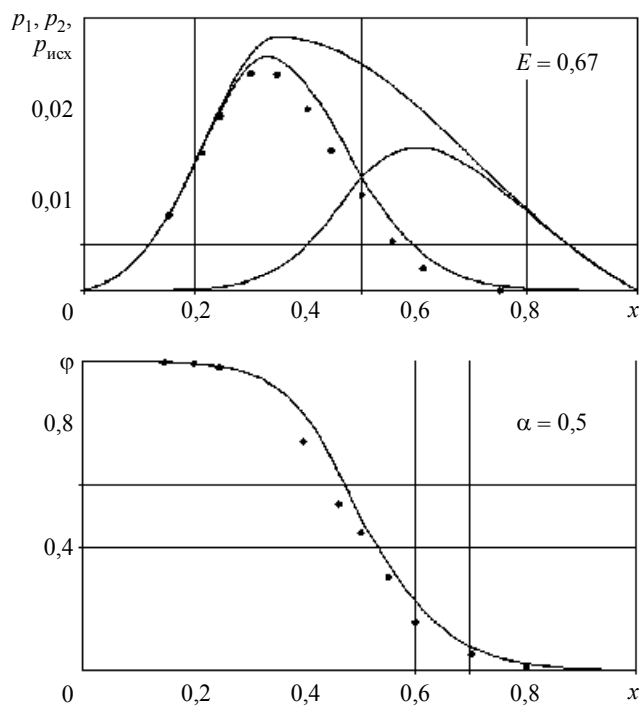


Рис. 3

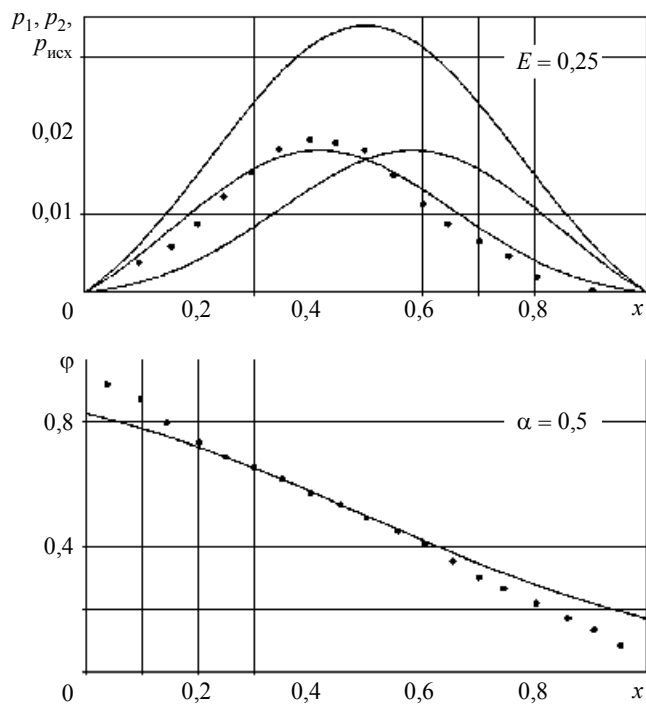


Рис. 4

Для этого, проводя расчёты удельной поверхности исходного порошка по известному распределению $p_{\text{исх}}(x)$ и получая значения удельной поверхности с помощью прибора, найдём корректирующий коэффициент K , равный $K = J_{\text{теор}} / J_{\text{опыт}}$.

Значение удельной поверхности мелкого продукта, используемого в разработанном методе, должно быть поправлено на величину $J_{1,\text{теор}} = K \cdot J_{1,\text{опыт}}$. Величина K в общем случае может быть функцией размера частиц $K = K(x)$. Для таких порошкообразных материалов целесообразно учитывать переменность K в расчётах, проводя дополнительные исследования по определению $K(x)$.

Разработанный метод использовался для оценки эффективности классификации порошкообразного алюминия АСД-1 при разделении его с помощью блока разделения на фракции анализатора дисперсного состава [2]. Для оценки работоспособности метода в ходе опытов изменением режимно-геометрических параметров классификатора (ВЦК) достигалось различное качество разделения.

Анализ гранулометрического состава исходного порошка, крупных и мелких фракций осуществлялся прибором ТА-2. Удельная поверхность рассчитывалась по результатам анализа на ЭВМ по формуле (8). Для измерения удельной поверхности исходного порошка и продуктов разделения применялся прибор ПСХ-4, усовершенствованный с целью повышения точности измерения. Время падения столба жидкости при фильтрации воздуха через слой исследуемого порошка регистрировалось следящей системой с оптоэлектронными датчиками, что дало возможность значительно снизить погрешность и увеличить рабочий диапазон прибора.

Значение корректирующего множителя, учитывающего несферичность частиц, и приборный коэффициент ПСХ-4 оказалось равным $K = 1,62$.

Как показали результаты экспериментальных исследований, для исследуемого порошка АСД-I величина K может быть принята постоянной. Применение метода газопроницаемости для замера удельной поверхности является физически обоснованным, так как с его помощью регистрируется внешняя поверхность частиц без учёта микротрещин и т.д., что может служить характеристикой их крупности.

Как показано в работе, предложенный метод оценки качества процессов классификации ультрадисперсных порошков имеет достаточно высокую точность. Использование предлагаемого метода позволяет значительно упростить лабораторный анализ проб и, в конечном счёте, повысить эффективность исследований, особенно в области размеров частиц, выходящих за пределы рабочего диапазона большинства распространённых приборов для анализа дисперсного состава порошков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шваб А.В., Никульчиков В.К., Шилько А.К. Метод расчёта эффективности процесса классификации на основе измерения удельных поверхностей порошкообразных материалов // Материалы Всес. конф. «Технология сыпучих материалов». Белгород, 1986. С. 127–128.
2. Никульчиков В.К., Шваб А.В., Шилько А.К. Метод расчёта эффективности классификации и качества смешения порошкообразных материалов. Томск, 1987 / Деп. ВИНТИ № 4861-87. 24 с.
3. Шваб А.В., Никульчиков В.К., Харламова И.Н., Шилько А.К. К оценке принципиальных возможностей определения эффективности классификации на основе измерений удельных поверхностей порошкообразных материалов // Вопросы прикладной аэрогидромеханики и тепломассообмена: сб. ст. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989. С. 132–146.

4. Шваб А.В., Зятиков П.Н., Росляк А.Т., Сосновский Н.Д. К вопросу определения эффективности процесса классификации дисперсных материалов. Томск, 1985 / Деп. ВИНТИ № 44-85. 26 с.
5. Зятиков П.Н., Шваб А.В., Росляк А.Т. Сосновский Н.Д. Метод расчёта эффективности классификации порошков на отдельные по крупности частиц фракции // Изв. вузов. Физика. 2008. № 8/2. С. 172–177.

Статья поступила 07.10.2010 г.

Schwab A.V., Zyatikov P.N., Brendakov V.N., Nikul'chikov V.K. A METHOD FOR CALCULATION OF POWDER CLASSIFICATION EFFICIENCY BASED ON MEASUREMENTS OF THEIR SPECIFIC SURFACES. Efficiency of the classification processes for powdered materials is usually calculated by the results of the analysis of the granulometric composition of the initial, large, and small separation products. In the case of processing of fine and ultra fine powder materials, such analysis is very time-consuming. Therefore, simple rapid methods are promising for quick monitoring of the quality of fine powder separation.

Keywords: specific surface, boundary size, effectiveness of the classification process, separatrix, dust and gas stream, separation products.

SCHWAB Aleksandr Veniaminovich (Tomsk State University)

ZYATIKOV Pavel Nikolaevich (Tomsk State University)

E-mail: zpn Pavel@sibmail.com

BRENDAKOV Vladimir Nikolaevich (Tomsk State University)

NIKUL'CHIKOV Viktor Kensarinovich (JSC „Zentsibnefteprovod“)