

УДК 622.7

В.А. Адов, В.В. Морозов

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ ФОРМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБОГАТИМОСТИ УГЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Задачей экспериментальных исследований являлось определение степени варьирования аэродинамических свойств кусков угля и породы. Исследования проводились на специально сконструированной установке, в которой был реализован принцип вакуумно-пневматической сепарации. В результате проведенных исследований установлены закономерности влияния формы зерен обогащаемого материала на их аэродинамические свойства и разработан критерий формы угля, предназначенный для использования при определении границ крупности обогащаемого класса.

Ключевые слова: пневматическая сепарация, обогащение углей, коэффициент формы, концентрат, зольность.

Семинар № 26

В теории обогащения угля методом пневматической сепарации указывается, что нерегулярная форма кусков угля и породы снижает показатели обогащения [1]. Однако для количественного определения степени влияния формы кусков добываемого угля на его обогатимость исследований в достаточном объеме не проводилось.

Целесообразно выделить несколько классических форм, к которым приближается реальный кусок угля или породы. Эти формы представлены в таблице 1; там же представлены взятые из литературы данные относительно аэродинамических характеристик угля и породы.

Форма кусков угля представляет собой неправильные геометрические тела. Степень их отклонения от шарообразной формы оценивают при помощи критерия несферичности, определяемого расчетным путем или экспериментально и коррелирующего с отклонением линейных размеров объекта от фигуры шара.

Коэффициент формы (несферичности) f рассчитывается как отношение поверхности частицы F_q к поверхности равновеликого шара F_w по уравнению:

$$f = \frac{F_q}{F_w} = \left(\frac{d_F}{d_V} \right)^2 \quad (1)$$

где d_F , d_V – диаметры шаров, которые эквивалентны частице по поверхности и по объему.

Обратной по смыслу является величина коэффициента сферичности (ϕ), рассчитываемого по уравнению:

$$\phi = f^{-1} \quad (2)$$

Динамический коэффициента формы f_d рассчитывается как отношение коэффициента лобового сопротивления несферической частицы ($F_{d\chi}$) к коэффициенту лобового сопротивления сферической частицы ($F_{dш}$), равной ей по объему:

$$f_d = \frac{F_{d\chi}}{F_{dш}} = \left(\frac{d_3}{d_V} \right)^2 \quad (3)$$

где d_3 – эффективный диаметр частицы.

Таблица 1
Аэродинамические характеристики кусков классической геометрической формы и природных объектов [2, 3]

Характеристика образца		Коэффициент формы (несферичности)
1	Шар	1
2	Куб	1,24
3	Тераэдр	1,49
4	Прямоугольная призма	1,38
6	Антрацит, класс 25-50 мм	1,54
7	Каменный уголь, класс 6-11 мм	1,87
7	Щебень, класс 25-30 мм	1,61

Динамический коэффициент формы может быть измерен только экспериментальным путем. Исследования проводились на специально сконструированной установке, в которой был реализован принцип вакуумно-пневматической сепарации (рис. 1).

Экспериментальная установка была оснащена современной измерительной техникой: датчиком скорости воздушного потока «Veloport-20» и измерителем силы лобового сопротивления образцов в воздушном потоке, созданном на основе измерительных весов с возможностью фиксации растягивающих усилий Sima Scale 200x0.01.

Для проведения исследований были отобраны куски угля одинакового

размера. Средний объем этих кусков соответствовали специально изготовленным модельным кускам идеальной формы. Куски неправильной формы располагались на штоке в трех положениях, пространственно соответствующих их главным осям. Затем вычитывалось среднее значение.

Различия в известных из литературных данных уравнений для расчета коэффициента и, соответственно, значений этих коэффициентов даже для «классических» фигур требует проведения дополнительных исследований. В аэrodинамике важно не соотношение площадей поверхностей фигур различной формы а соотношение их эффективных сечений.

Задачей экспериментальных исследований являлось определение уровня варьирования аэродинамических свойств кусков угля различной формы.

Для оценки степени и характера влияния формы на аэродинамические свойства кусков угля и породы были проведены исследования на модельных образцах и образцах угля фракции угля крупностью 20–25 мм.

Результаты измерений силы лобового сопротивления и динамического коэффициента формы, рассчитываемого как отноше-

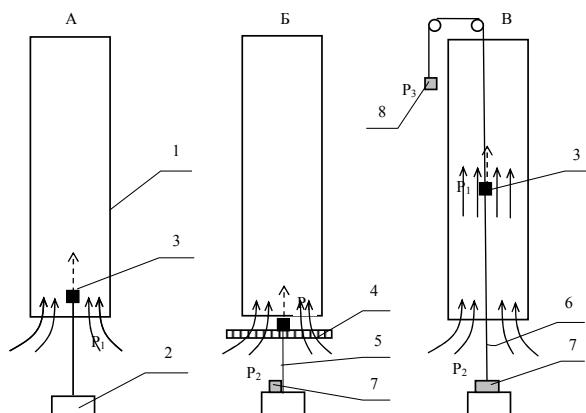


Рис. 2. Схема приспособления для измерения силы лобового сопротивления образца: 1 - сопло; 2 - весы; 3 - образец; 4 - решетка; 5 - тросик; 6 - нить; 7 - грузик; 8 - противовес

Таблица 2
Результаты измерений силы лобового сопротивления и коэффициента формы для геометрически правильных образцов и природных кусков угля и породы

№	Описание образца	Скорость воздуха, м/с	Сила лобового сопротивления, Н	Коэффициент формы (средний)
1	Сфера (шар)	15	143	1
2	Куб	15	156,3	1,25
3	Тетраэдр	15	187,4	1,5
4	Плоская призма с соотношением сторон 1:1:0,3 (пластина)	15	210	1,68
5	Вытянутая призма с соотношением сторон 1:1:4 (игольчатая)	15	219	1,9
6	Куски угля, фракция 20-25 мм		180	1,1-2,0 1,44
7	Куски породы, фракция 20-25 мм		186,3	1,1-2,1 1,49

ние лобового сопротивления образца к лобовому сопротивлению шара того же объема показали, что для образцов правильной формы (куб, тетраэдр) получены значения, близкие к известным из литературных данных. Также показано, что измеренные значения и коэффициент формы варьируются в очень широком диапазоне значений (табл. 2).

Результаты анализа кривых распределения показали, что фракций для угля и породы исследованных проб наблюдаются похожие типы распределения, близкие к логнормальному (рис 2, А,Б). Наблюдается сдвиг максимума на кривой распределения и среднего значения коэффициента лобового сопротивления. Характерно, что для труднообогатимого угля наблюдается больший коэффициент вариации значений коэффициента лобового сопротивления (табл. 2Б). Значительная вариация обусловлена также тем, что в исследуемой фракции представлены куски, существенно отличающиеся по крупности.

Для определения абсолютных значений характеристик распределения кусков угля по коэффициенту формы были поставлены опыты на узкой вы-

борке кусков с объемом 15 – 16 см³. Результаты исследований, приведенные в табл. 3, показали, что для узкой выборки характеристики распределения изменяются в сторону уменьшения коэффициента вариации.

Общий вид зависимостей и среднее значение параметра практически не изменяются.

При промышленных исследованиях углей выборка проб с кусками одинаковых размеров затруднительна. Учитывая схожесть результатов, полученных при анализе характеристик фракций угля и породы, ограниченных по размеру (20-25 мм) и объему (15-16 мм) в качестве объекта, на основании измерений которого предполагалось оценивать обогатимость угля, была выбрана фракция заданной крупности.

Измерение аэродинамических характеристик кусков угля и породы – трудоемкий процесс. Для ускоренного определения коэффициента формы (несферичности) целесообразно использовать упрощенный визиометрический способ, предполагающий анализ изображений кусков угля.

Начальной операцией является отбор представительной пробы рядового угля.

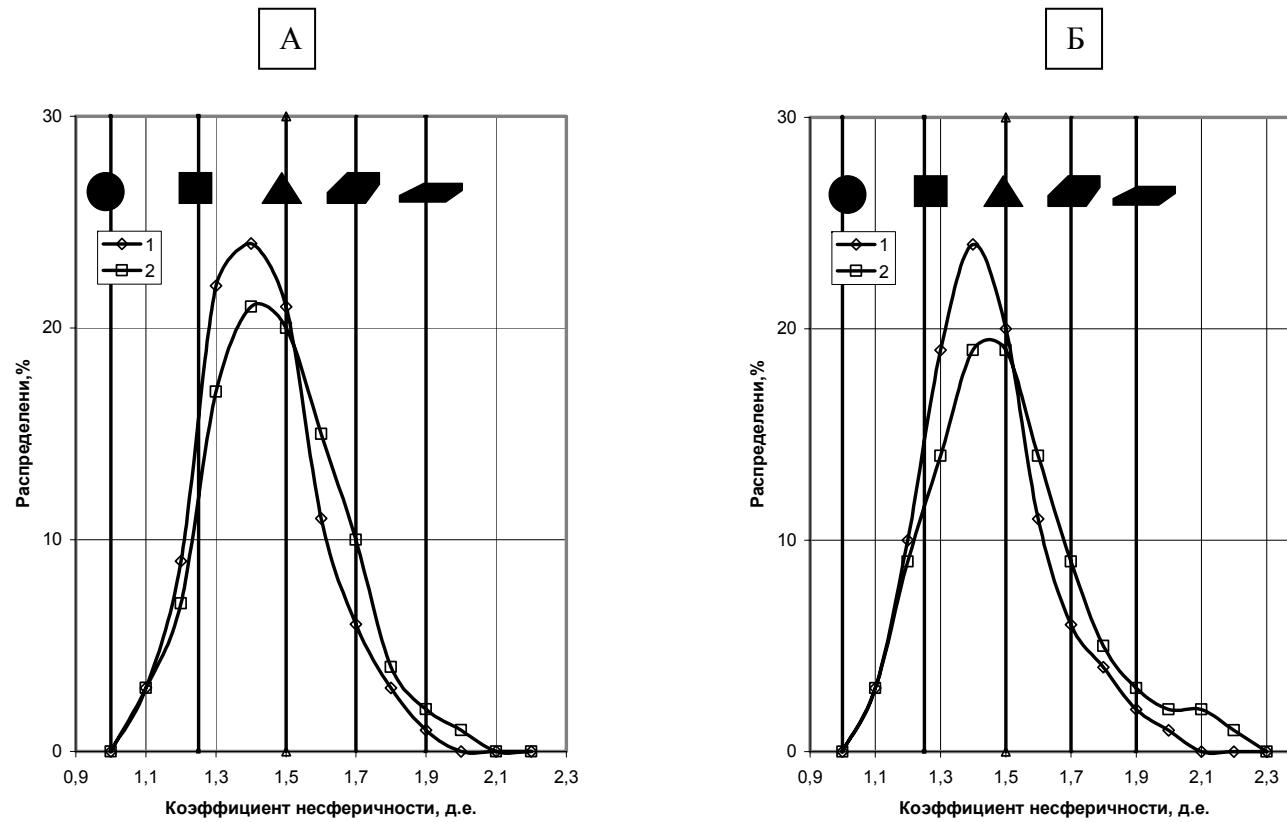


Рис. 2. Характеристики распределения кусков угля (1) и породы (2) по значениям их коэффициентов формы (несферичности): А - среднеобогатимый уголь; Б - труднообогатимый уголь

Таблица 3
**Сравнительные характеристики фракций угля и породы
крупностью 20–25 мм разреза «Бунгурский» и «Алардинский»**

№	Фракция	Сред. знач. динамич. к-та формы (ДКФ)	Коэф-т вариации ДКФ, %	Доля фракций с ДКФ	
				менее 1,2; %	более 1,7; %
1	Фракция угля крупностью 20–25 мм разреза «Бунгурский»	1,44	13,0	3,0	10,0
2	Фракция породы крупностью 20–25 мм разреза «Бунгурский»	1,49	14,3	3,0	19,0
3	Фракция угля с кусками объемом 15–16 см ³ разреза «Бунгурский»	1,37	11,2	1,0	8,0
4	Фракция породы с кусками объемом 15–16 см ³ разреза «Бунгурский»	1,43	12,6	2,0	14,0
5	Фракция угля крупностью 20–25 мм шахты «Алардинская»	1,44	13,5	3,0	13,0
6	Фракция породы крупностью 20–25 мм шахты «Алардинская»	1,49	15,0	3,0	22,0
7	Фракция угля крупностью 20–25 мм шахты «Восточная»	1,46	13,5	4,0	17,0
8	Фракция породы крупностью 20–25 мм шахты «Восточная»	1,51	16,4	4,0	29,0

Фракция выделяется путем усреднения и сокращения узкого класса крупности, например -25 + 20 мм. Второй операцией является фракционный анализ угля с получением фракции концентрата ($\rho \leq 1600$ кг/м³), промпродукта ($1600 \leq \rho \leq 2000$ кг/м³) и породы ($\rho \geq 2000$ кг/м³).

Третьей операцией является визуометрический анализ выбранных фракций угля и породы, предполагающий анализ изображений отдельных кусков с получением их геометрических характеристик формы. Методика предполагает ручную или компьютерную обработку изображений и измерение параметров формы.

Согласно первой методике изменяются диаметры описывающей и вписанной окружностей относительно контура образца (рис. 4). Несферичность образцов (коэффициент формы КФ_s) рассчитывается как отношение площади описывающей окружности ($S_1 = \pi D_1^2 / 4$) к площади вписанной окружности ($S_2 = \pi D_2^2 / 4$):

$$K\Phi_s = S_1 / S_2 \quad (4)$$

Согласно второй методике изменяются поперечное и продольное распространение контура образца в прямоугольном шаблоне (рис. 5). Несферичность образцов (коэффициент формы КФ_A) рассчитывается как отношение продольного линейного размера (A_1) к поперечному линейному размеру (A_2) (рис. 5).

$$K\Phi_A = A_1 / A_2 \quad (5)$$

Методика и программное обеспечение анализа соответствует используемым при анализе формы кусков и зерен в минералогии.

Обоснование возможности применения и выбор способа расчета геометрического коэффициента формы проводилось путем сравнения коэффициентов детерминированности зависимостей связей динамического и геометрического коэффициентов формы для исследованных образцов фракции 20–25 мм угля и породы шахты Алардинская.

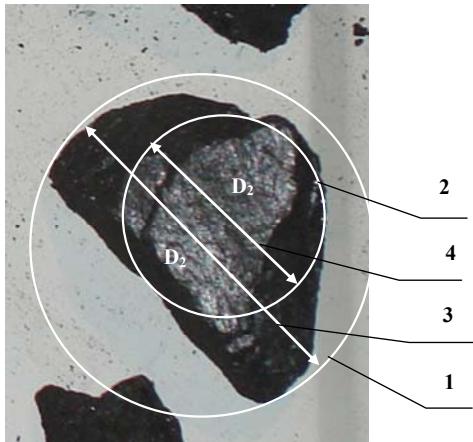


Рис. 3. Фотографическое изображение и схема оценки параметров коэффициента формы куска угля: 1, 2 – описывающая и вписанная в контур образца окружность; 3, 4 – диаметры описывающей и вписанной в контур образца окружностей

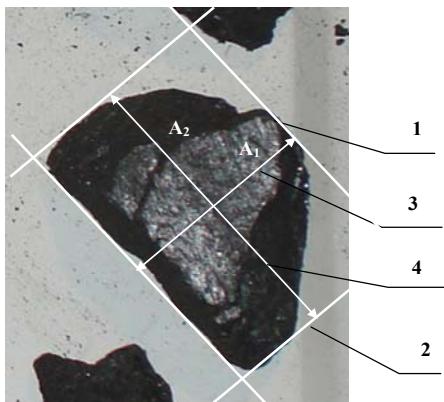


Рис. 4. Фотографическое изображение и схема оценки параметров коэффициента формы куска угля (Б): 1, 2 – продольная и поперечная граница шаблона; 3, 4 – поперечный и продольный размеры зерна

Результаты исследований показали, что динамический коэффициент формы ($K\Phi_D$) более тесно связан с коэффициентом формы $K\Phi_S$ ($Re^2 = 0,98$), рассчитанным по уравнению 4,

чем с. коэффициентом формы $K\Phi_A$ ($Re^2 = 0,97-0,98$), рассчитанным по уравнению 5.

Уравнения для расчета динамического критерия формы (Y) по значениям геометрических коэффициентов формы ($X=K\Phi_S$; $Z=K\Phi_A$) имеют вид:

Для фракции угля:

$$Y = -0,085X^2 + 0,816X + 0,319 \quad (6)$$

$$Y = -0,063Z^2 + 0,71Z + 0,418 \quad (7)$$

Для породной фракции

$$Y = 0,041X^2 + 0,124X + 0,885 \quad (8)$$

$$Y = 0,0413Z^2 + 0,101Z + 0,902 \quad (9)$$

В качестве критерия, определяющего степень влияния формы зерен на показатели пневматического обогащения был предложен расчетный параметр (P_F):

$$P_F = \gamma_{Y-0,2} + \gamma_{P+0,2} \quad (7)$$

где $\gamma_{Y-0,2}$ – массовая доля кусков угля (легкой фракции) со сниженным относительно среднего динамическим коэффициентом формы кусков во фракции; $\gamma_{P+0,2}$ – массовая доля кусков породы (тяжелой фракции) с повышенным более чем на 20% относительно среднего динамическим коэффициентом формы кусков во фракции.

Выбор такого критерия обусловлен тем фактом, что к взаимозагрязнению угля и породы приводит округлая форма кусков угля и угловатая форма кусков породы.

Предложенный параметр может использоваться параллельно с известными критериями, основанными на контрастности разделяемых фракций по разделительному признаку – плотности.

Правомерность применения критерия иллюстрируется данными на рис. 5, показывающими, что результаты пневматической сепарации промышленных углей тесно коррелируют с разработанным критерием P_F . Так, зависимость зольности концентрата от критерия P_F описывается для фракции

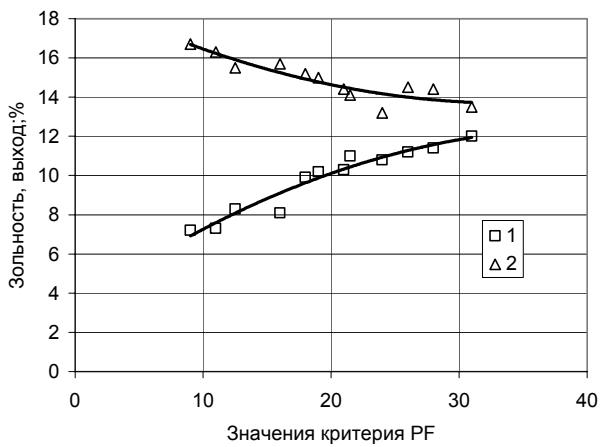


Рис. 5. Зависимости зольности концентратов (1) и выхода породы (2) от критерия PF

+25 -50 мм зависимостью $Y = 0,0048X^2 - 0,325X + 19,23$ при значении коэффициента детермированности 0,83. Зависимость выхода породы от значения критерия неоднородности формы PF описывается зависимостями, представленными в таблице

Значение критерия неоднородности формы целесообразно использовать при выборе граничных значений крупности обогащаемой фракции. Отношение максимального зерна к минимальному (K_d) в обогащаемом классе рассчитывается как функция критерия равнопадаемости (K_p) и относительного критерия формы (K_ϕ):

$$K_d = K_p K_\phi \quad (8)$$

где $K_\phi = (100+PF_i)/100$; PF_i – значение критерия неоднородности формы для исследуемой фракции.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены закономерности влияния формы зерен обогащаемого материала на их аэродинамические свойства и разработан критерий формы угля, предназначенный для использования при определении границ крупности обогащаемого класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берт Р.О., Миллз К. Технология гравитационного обогащения; Пер. с англ. Е. Д. Бачевой, / М. Недра. - 1990. -574 с.
2. Прандтль Л., Тильденс О. Гидро И. Аэромеханика. Лекции. - 1934. – 313 с.
3. Мухленов И.П., Сажин Б.С., Фролов В.Ф. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник. - 1986. -352 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Морозов В.В. – зав. кафедрой химии, профессор, доктор технических наук,
Алов В.А. – аспирант кафедры «Обогащение полезных ископаемых»,
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru