К.А.ДОЛГОВ
Санкт-Петербургский горный институт, Россия

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПОКАЗАТЕЛЕМ НЕРАВНОМЕРНОГО ДРОБЛЕНИЯ

Результат действия взрыва в трещиноватой горной породе зависит от степени ее трещиноватости, которую можно охарактеризовать фракционным составом размеров кусков в массиве. Трещиноватые массивы обычно принято классифицировать на весьма крупноблочные, крупноблочные, среднеблочные и мелкоблочные. Для прогнозирования устойчивых результатов отбойки необходимо знать категорию трещиноватости массива. Для оценки трещиноватости массива введем показатель неравномерного дробления α [2],

$$\alpha = \frac{S_v - S_e}{S_e}, \qquad (1)$$

где S_v и S_e – поверхность кусков соответственно при неравномерном и равномерном дроблении.

Пусть кусок неправильной геометрической формы имеет средний размер, равный полусумме максимального и минимального размеров d_b. Возьмем шар, равный куску по объему и площади поверхности. Объем V_p и площадь поверхности S_p эквивалентного шара выразим через средний размер:

$$V_p = \frac{\pi k_f^3 d_b^3}{6} \quad \text{и} \quad S_p = \pi k_s^2 d_b^2,$$

где k_f и k_S – коэффициенты формы объема и поверхности.

Из отношения $S_P / V_P = 6k / d_b$, где $k = k_S^2 / k_f^3$, получим $S_p = 6kV_p / d_b$. При дроблении монолита взрывом средним размером всех кусков неправильной геометрической формы является средний геометрический диаметр d_g, определяемый из выражения

$$\ell n\ d_g = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V} \ell n d_{bi}, \tag{2}$$

где V_i – объем фракции со средним размером кусков d_{bi}; V – весь разрушенный объем.

Поверхность кусков при равномерном дроблении

$$S_e = 6kV / d_g, \tag{3}$$

а при неравномерном дроблении –

$$S_V = 6k \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{d_{bi}}. \tag{4}$$

Подставляя (3) и (4) в (1), получим

$$\alpha = d_g \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V} \frac{1}{d_{bi}} - 1. \tag{5}$$

Показатель неравномерного дробления позволяет определять принадлежность массива к определенной категории трещиноватости.

В натурных условиях влияние трещиноватости массива горных пород на качество дробления исследовалось сотрудниками Кольского филиала АН СССР и комбината «Печенганикель» [3]. На карьерах комбината «Печенганикель» были проведены опытно-промышленные взрывы в породах (габбро, пироксениты, перидотиты, филиты) с разной степенью трещиноватости, но при неизменных параметрах буровзрывных работ (диаметр скважин 269 мм, площадная нагрузка 54 м^2).

Удельный расход ВВ (аммонит № 6 ЖВ) составлял 0,7 кг/м^3. Был получен гранулометрический состав разрушенной горной массы для этих условий взрывания в породах с разной степенью трещиноватости (табл.1). По результатам измерения гранулометрического состава в массиве и разрушенной взрывом горной массы по формуле (2) были рассчитаны средние геометрические диаметры в массиве d_{gm} и после взрыва d_g, а также показатели неравномерного дробления в массиве α_m и после взрыва α. Предварительное разрушение этих пород взрывом в условиях одинаковой трещиноватости показало, что петрографический состав их практически не повлиял на степень дробления. Как следует из табл.1, показатель неравномерного дробления характеризует трещиноватость по гранулометрическому составу не только массива, но и разрушенной взрывом горной массы.

Сравним оценку трещиноватости вскрышных пород на угольном разрезе имени 50-летия Октября производственного объединения «Кемеровуголь», характеризуемую удельной трещиноватостью M [5] и показателем степени неравномерного дробления α. Удельная трещиноватость

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\ell_i},$$

где n – количество систем трещиноватости; ℓ_i – расстояние между трещинами i-й системы.

Таблица 1

Средние геометрические диаметры кусков и показатели неравномерного дробления в массиве (в числителе) и в разрушенной взрывом горной массе (в знаменателе)

Категория пород	Степень взрываемости и трещиноватости	Содержание фракции (%) крупностью, см						d_{gm}, см	d_g, см	α, %
		0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	+100			
I	Весьма трудновзрываемые,слабо трещиноватые	0,4 / 38,8	3,2 / 27,5	16,7 / 15,7	46,5 / 8,3	23,2 / 4,7	10,0 / 5,0	76,0	25,6	8,0 / 36,5
II	Трудновзрываемые трещиноватые	0,8 / 45,7	5,7 / 28,0	26,0 / 14,5	47,3 / 6,3	14,2 / 3,0	6,0 / 2,5	65,0	22,1	8,5 / 31,5
II	Средневзрываемые сильно трещиноватые	6,9 / 62,8	35,1 / 15,6	35,3 / 11,9	17,3 / 5,2	6,0 / 2,4	0,4 / 2,1	41,4	17,6	18,3 / 26,1
IV	Легковзрываемые, весьма трещиноватые	10,4 / 64,0	46,5 / 25,7	29,9 / 5,6	12,6 / 2,1	0,6 / 0,6	0 / 2,0	35,2	16,1	19,0 / 19,0

Таблица 2

Значения показателя неравномерного дробления для различных категорий пород по трещиноватости

Категория пород по трещиноватости, блочность, удельная трещиноватость	Параметры БВР			Выход фракций (%), крупностью мм							α по формуле (5)
	d_0 мм	S, м^2	q, кг/м^3	0-200	200-500	500-800	800-1000	1000-1200	1200-1500	1500	
I, мелкоблочные, M >3 м$^{-1}$	160	7x6	0,27	85,5	11,8	2,7	0	0	0	0	0,09
	160	5x5	0,47	89,7	8,3	2,0	0	0	0	0	0,06
	160	7x6	0,27	62,0	35,0	3,0	0	0	0	0	0,19
	160	5x5	0,85	60,0	40,0	0	0	0	0	0	0,18
	160	6x5	0,32	90,5	8,5	1.0	0	0	0	0	0,05
II, среднеблочные, M =2÷3 м$^{-1}$	200	8x8	0,32	49,2	31,4	12,1	5,6	1,7	0	0	0,33
	160	5x4,5	0,42	68,0	20,0	11,0	0,5	0,5	0	0	0,22
	160	6x5	0,40	22,0	53,0	18,0	6,6	0,4	0	0	0,29
	220	7x7	0,38	63,9	18,4	12,2	3,9	1,6	0	0	0,28
	160	6x5	0,38	61,5	21,8	9,0	6,6	1,1	0	0	0,29
III, выше средней блочности M =1,5÷2 м$^{-1}$	160	7x6	0,40	40,0	35,0	15,0	5,0	3,0	2,0	0	0,38
	220	7x6	0,48	59,6	22,6	6,9	2,7	5,7	2,5	0	0,34
	220	8x7	0,31	62,8	13,7	11,2	5,3	3,0	4,0	0	0,36
	200	8x7	0,30	31,3	43,2	14,1	5,2	4,0	2,2	0	0,37
	200	8x8	0,32	54,5	25,4	13,3	1,6	1,4	3,9	0	0,35
IV, крупноблочные, M =1÷1.5 м$^{-1}$	160	7x6	0,29	66,7	14,5	7,2	3,2	1,8	2,0	4,6	0,34
	220	8x7	0,51	51,5	25,9	9,7	6,5	2,0	3,2	1,2	0,39
	200	8x7	0,37	23,7	53,0	16,1	5,0	1,2	0,2	0,8	0,30
	220	8x7	0,32	37,4	34,4	14,9	5,8	1,8	1,8	3,9	0,43
V, весьма крупноблочные, M < 1, 0 м$^{-1}$	200	8x7	0,34	21,0	36,5	12,9	7,7	1,2	0,7	10,0	0,48
	200	8x7	0,35	49,2	9,0	14,5	10,8	6,7	3,3	6,5	0,60
	220	8x7	0,40	15,0	30,0	35,5	7,2	5,3	3,0	4,0	0,40
	200	8x7	0,41	30,0	20,0	30,1	7,9	3,0	2,5	6,5	0,55

Определение удельной трещиноватости производилось непосредственно по замерам расстояний между трещинами на естественных обнажениях взрываемого блока. Кусковатость пород (алевролиты, аргиллиты, песчаники) после отбойки определялась линейным и фотолинейным методами по поверхности развала. Все породы были разделены на пять категорий тре-

щиноватости и для каждой определены значения M (табл.2). Одновременно для различных параметров буровзрывных работ определено значение α. Данные табл.2 показывают возрастание значений α в соответствии с ростом категории пород.

Наибольшие трудности в определении трещиноватости по естественным обнажениям представляют крупноблочные и весьма крупноблочные породы, в которых проводились взрывы. Значения α для этих групп выходят из указанных диапазонов, что может быть объяснено трудностью определения удельной трещиноватости для этих категорий пород.

Данные табл.2 показывают, что показатель неравномерного дробления не зависит от удельного расхода ВВ – энергетического параметра, определяющего действие взрыва в трещиноватом массиве. Для логарифмически-нормального закона распределения кусков по размерам можно получить более точное выражение для показателя неравномерного дробления. В этом случае поверхность кусков при неравномерном и равномерном дроблении определится соответственно из выражения

$$S_V = 6kV_e \int_0^{V_e} \frac{1}{d_b}\frac{dV}{V_e},$$

и

$$S_e = 6k\frac{V_e}{d_g},$$

где V_e – разрушаемый объем.

При этом

$$\alpha = d_g \int_0^{V_e} \frac{1}{d_b}\frac{dV}{V_e} - 1. \qquad (6)$$

Обозначим диаметр куска через x. Для логарифмически-нормального закона распределения кусков по размерам имеем [1]

$$\frac{dV}{V_e} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ell n\sigma}\exp\left[-\frac{(\ell nx - \ell nd_g)^2}{2\ell n^2\sigma}\right]d\ell nx,$$

где $\ell n^2\sigma$ – дисперсия.

В этом случае

$$\int_0^{V_e}\frac{1}{d_b}\frac{dV}{V_e} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ell n\sigma}\int_0^{d\max}\exp[-\frac{(\ell nx - \ell nd_g)^2}{2\ell n^2\sigma}]\frac{1}{x}d\ell nx. \qquad (7)$$

Произведем в (7) подстановку:

$$\frac{\ell nx - \ell nd_g}{\ell n\sigma} = t. \qquad (8)$$

При этом $\ell nx = t\ell n\sigma + \ell nd_g$; $x = \exp[t\ell n\sigma + \ell nd_g]$; $1/x = \exp[-(t\ell n\sigma - \ell nd_g)]$;

$d\ell nx = \ell n\sigma\, dt$ (при $x = 0$ значение $t = -\infty$).

Тогда

$$\int_0^{V_e}\frac{1}{d_b}\frac{dV}{V_e} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{t_{\max}}\exp[-\frac{1}{2}(t^2 + 2t\ell n\sigma + 2\ell nd_g)]dt =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{t_{\max}}\exp[-\frac{1}{2}(t + \ell n\sigma)^2]\exp[\frac{1}{2}(-2\ell nd_g + \ell n^2\sigma)]dt =$$

$$\frac{1}{d_g}\sigma^{\frac{\ell n\sigma}{2}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{t_{\max}}\exp[-\frac{1}{2}(t+\ell n\sigma)^2]dt\,. \qquad (9)$$

Произведем подстановку в (8):

$$t+\ell n\sigma = z\,. \qquad (10)$$

При этом $dt = dz$, $t = -\infty$, $z = -\infty$. Окончательно

$$\int_0^{V_e}\frac{1}{d_b}\frac{dV}{V_e} = \frac{1}{d_g}\sigma^{\frac{\ell n\sigma}{2}}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{t_{\max}}\exp[-\frac{z^2}{2}]dz$$

или

$$\int_0^{V_e}\frac{1}{d_b}\frac{dV}{V_e} = \frac{1}{d_g}\sigma^{\frac{\ell n\sigma}{2}}\Phi(z_{\max}), \qquad (11)$$

где $\Phi(z_{\max})$ – значение интеграла вероятности, определяемого по таблице [1].

Подставляя (11) в (6), получим

$$\alpha = \sigma^{\frac{\ell n\sigma}{2}}\Phi(z_{\max})-1\,. \qquad (12)$$

Конечное значение $z_{\max}$ определяется размером максимального куска. Из (8) и (10) имеем

$$z = \frac{\ell nx - \ell nd_g}{\ell n\sigma} + \ell n\sigma\,.$$

Откуда конечное значение

$$z_{\max} = \frac{\ell nd_{\max} - \ell nd_g}{\ell n\sigma} + \ell n\sigma\,.$$

При $d_{\max} \to \infty$ значение $\Phi(z_{\max}) \to 1$. При достаточно большом $d_{\max}$ значение $\Phi(z_{\max}) \approx 1$ и $\alpha \approx \sigma^{\frac{\ell n\sigma}{2}} - 1$.

Дисперсия размеров кусков при логарифмически-нормальном законе распределения зависит от трещиноватости (блочности) массива, а для массивов постоянной блочности не зависит от удельного расхода ВВ. Последнее было показано в работе [4]. Таким образом, показатель неравномерного дробления может служить характеристикой трещиноватости массива как по данным начальной трещиноватости до дробления массива взрывом, так и по данным гранулометрического состава разрушенной взрывом горной массы, что позволяет характеризовать трещиноватость массива по результатам действия взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев С.Е.* Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава / С.Е.Андреев, В.В.Товаров, В.А.Перов. М.: Металлургиздат, 1960.

2. *Долгов К.А.* Определение степени неравномерного дробления крепких горных пород взрывом // Изв. вузов. Горный журнал. 1977. № 2.

3. *Мазаник В.Н.* Совершенствование технологии взрывных работ в трещиноватом массиве / В.Н.Мазаник, Ю.И.Гусев, С.Н.Зверьков // Физика и технология разрушения пород взрывом / КФАН СССР. Апатиты, 1974.

4. *Макарьев В.П.* Постоянство логарифмической дисперсии распределения размеров кусков при разрушении горных пород / В.П.Макарьев, В.А.Падуков, Ю.И.Виноградов // Физические процессы горного производства / Ленинградский горный институт. Л., 1976. Вып.3.

5. *Репин Н.Я.* Подготовка и экскавация вскрышных пород угольных разрезов. М.: Недра, 1978.