УДК 622.235

П.С. Симонов

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА СРЕДНЕГО КУСКА И ВЫХОДА НЕГАБАРИТА ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ НА КАРЬЕРАХ

Произведен анализ методов оценки гранулометрического состава взорванной горной массы и качества дробления горных пород. Предлагается для определения параметра σ логарифмически нормального распределения использовать метод наименьших квадратов. Для более точного приближения теоретической кривой логарифмически нормального приближения к результатам измерений гранулометрического состава рекомендуется рассечение области поступления на две части по среднему медианному размеру куска. Применение встроенных функций логарифмически нормального распределения Excel и Mathcad позволяет автоматизировать работу по оценке гранулометрического состава взорванной горной массы.

Ключевые слова: взрыв, дробление, кусок, средний размер куска, гранулометрический состав.

При организации ресурсосберегающего производства взрывных работ на карьерах необходимо после каждого массового взрыва определять параметры гранулометрического состава взорванной горной массы, такие как средний размер куска и выход негабарита. Оперативная оценка качества взрыва позволяет корректировать параметры буровзрывных работ и тем самым снижать себестоимость добычи полезного ископаемого на предприятии.

Для измерения гранулометрического состава разрушенных пород используются такие методы как ситовый анализ; поштучный обмер (учет); планиметрический (фотопланиметрический), линейный (фотолинейный) и точечный методы.

Поштучный обмер негабаритных кусков по трем взаимно перпендикулярным направлениям получил широкое применение на карьерах и если известен закон распределения кусков по размерам, позволяет оценивать гранулометрический состав взорванной горной массы в целом.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 320–327.
© 2017. П.С. Симонов.

Планиметрический (метод Делесса), линейный (метод Розиваля) и точечный (метод А.А. Глаголева) впервые были применены для анализа шлифов под микроскопом при определении минерального состава горных пород [1]. Для оценки кусковатости взорванной горной массы эти методы предложил применять в 1947 г. Л.И. Барон [2].

В производственных условиях оценка гранулометрического состава должна строиться на основе заранее установленных законов распределения кусков с минимальным количеством параметров. Например, в практике оценки кусковатости взорванной горной массы широко используется логарифмически нормальный закон распределения, характеризующийся двумя параметрами – μ и σ.

Плотность логарифмически нормального распределения задается зависимостью

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \qquad (1)$$

где μ, σ – параметры, характеризующие логнормальное распределение.

Параметр μ представляет собой натуральный логарифм среднего медианного размера куска d_{50} и определяется энергетическими и детонационными параметрами взрывного нагружения. Параметр σ, по мнению ряда исследователей [1, 2], остается постоянным до и после взрыва и зависит от структурных особенностей конкретного типа горных пород.

Для определения параметров логарифмически нормального распределения часто используется вероятностно-логарифмическая сетка, где по оси абсцисс откладываются диаметры кусков в логарифмическом масштабе, по оси ординат наносятся суммарные выходы классов в масштабе, основанном на интеграле функции распределения вероятности. Параметры d_{50} и σ при этом определяются графически, что усложняет работу и увеличивает погрешность измерений.

В настоящее время в электронных таблицах Excel и математическом редакторе Mathcad доступны функции (ЛОГНОРМРАСП и plnorm, dlnorm соответственно) позволяющие строить и анализировать кривые логарифмически нормального распределения.

Средний медианный размер куска d_{50} определяется непосредственно из эксперимента это кусок соответствующий суммарному выходу 50%.

Средний размер куска (математическое ожидание) определяется по зависимости

$$d_{ср} = \frac{\sum(d_i \gamma_i)}{100}, \qquad (2)$$

где d_i – средний диаметр i-го класса; γ_i – выход i-го класса по весу.

Параметр σ логарифмически нормального распределения может быть определен 2 способами.

1 способ

Размеры d_{50} и $d_{ср}$ исходя из свойств логарифмически нормального закона распределения связаны между собой соотношением

$$d_{ср} = \exp\left(\ln(d_{50}) + \frac{1}{2}\sigma^2\right). \qquad (3)$$

Решив это уравнение, легко рассчитывается параметр σ логарифмически нормального распределения по выражению

$$\sigma = \sqrt{2 \cdot \ln\left(\frac{d_{ср}}{d_{50}}\right)}. \qquad (4)$$

2 способ

Параметр σ может быть определен также методом наименьших квадратов. Наилучшим значением σ является то, которое минимизирует сумму квадратов разности экспериментальных точек и теоретической кривой логарифмически нормального распределения.

Проанализируем предложенные способы определения параметров логарифмически нормального распределения на основе исследований проведенных на Агаповском известняковом карьере ОАО «ММК» для одного из взрываемых блоков (таблица).

Параметры распределения кусков в массиве:

$$D_{ср} = 0{,}67 \text{ м}; \; D_{50} = 0{,}51 \text{ м}.$$

$$\mu = \ln(0{,}51) = -0{,}673, \; \sigma = 0{,}739 \text{ (по формуле 4)}.$$

Параметры распределения кусков в развале:

$$d_{ср} = 0{,}41 \text{ м}; \; d_{50} = 0{,}35 \text{ м}.$$

$$\mu = \ln(0{,}35) = -1{,}050, \; \sigma = 0{,}563 \text{ (по формуле 4)}.$$

На рис. 1 представлена интегральная кривая распределения кусков в массиве и развале взорванной горной массы определенная 1 способом.

Гранулометрический состав

Классы крупности	До взрыва (в массиве)		После взрыва (в развале)	
	выход класса, γ_i, %	накопленный выход (по минусу)	выход класса, γ_i, %	накопленный выход (по минусу)
+0–0,1	9,981	9,981	21,250	21,250
+0,1–0,2	8,311	18,292	7,658	28,908
+0,2–0,3	9,000	27,292	12,697	41,605
+0,3–0,4	12,292	39,584	13,447	55,053
+0,4–0,5	9,706	49,290	12,671	67,724
+0,5–0,6	8,070	57,360	10,566	78,289
+0,6–0,7	7,192	64,552	6,671	84,961
+0,7–0,8	5,051	69,603	4,737	89,697
+0,8–0,9	4,362	73,965	3,579	93,276
+0,9–1,0	4,021	77,986	1,566	94,842
+1,0–1,1	2,971	80,957	2,250	97,092
+1,1–1,2	3,115	84,072	0,553	97,645
+1,2–1,3	2,674	86,746	0,605	98,250
+1,3–1,4	1,904	88,650	0,658	98,908
+1,4–1,5	2,057	90,707	0,711	99,618
+1,5–1,6	1,628	92,335	0,382	100,000
+1,6–1,7	1,243	93,578		
+1,7–1,8	0,794	94,371		
+1,8–1,9	1,403	95,774		
+1,9–2,0	1,038	96,813		
+2,0–2,1	0,938	97,751		
+2,1–2.2	0,493	98,244		
+2,2–2,3	0,517	98,761		
+2,3–2,4	0,180	98,942		
+2,4–2,5	0,188	99,130		
+2,5–2,6	0,000	99,130		
+2,6–2,7	0,204	99,334		
+2,7–2,8	0,212	99,547		
+2,8–2,9	0,220	99,767		
+2,9–3,0	0,000	99,767		
+3,0–3,1	0,233	100,000		

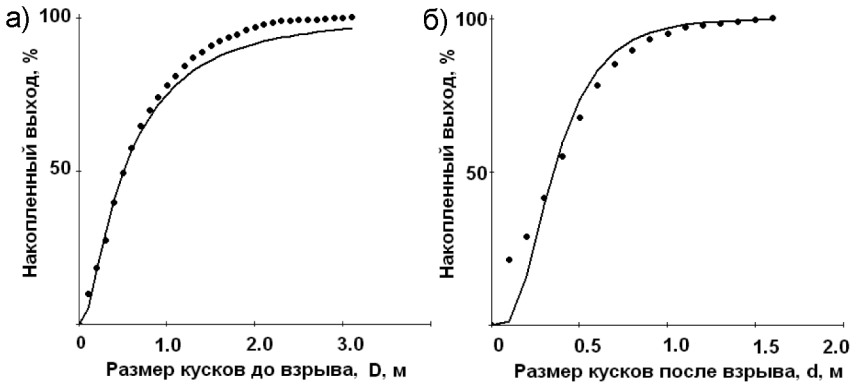

Рис. 1. Интегральные кривые распределения кусков до (а) и после (б) взрыва (1 способ)

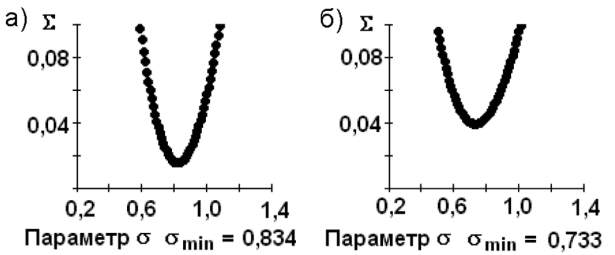

Рис. 2. Минимизация параметра σ для нахождения теоретической кривой наиболее точно описывающей результаты экспериментальных измерений

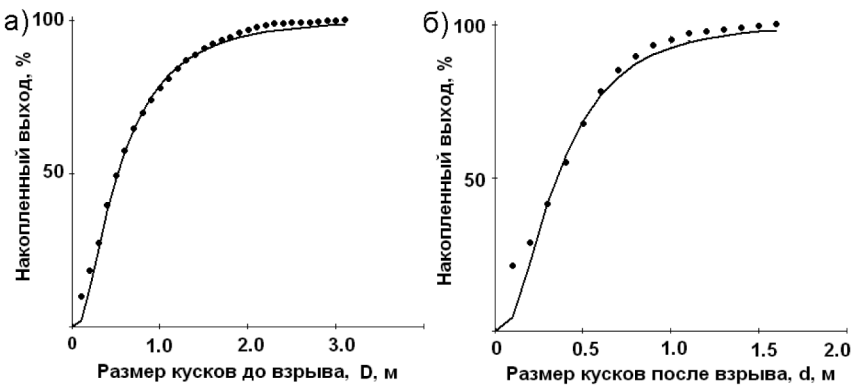

Рис. 3. Интегральные кривые распределения кусков до (а) и после (б) взрыва (2 способ)

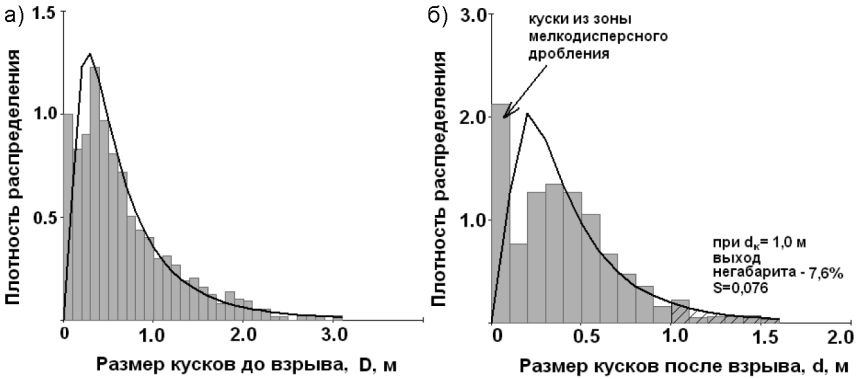

Рис. 4. Нормированная гистограмма экспериментальных данных и теоретическая дифференциальная кривая логарифмически нормального распределения

На рис. 2 представлено определение параметра σ методом наименьших квадратов выполненное по 2 способу.

На рис. 3 представлена интегральная кривая распределения кусков в массиве и развале взорванной горной массы определенная 2 способом.

Нормированная гистограмма экспериментальных данных и теоретическая плотность распределения представлена на рис. 4.

Наибольшее расхождение опытных результатов от теоретической кривой наблюдается для кусков малых размеров от 0 до 0,2 м. При оценке трещиноватости массива такие куски часто наблюдаются в верхней части уступа, разрушенной взры-

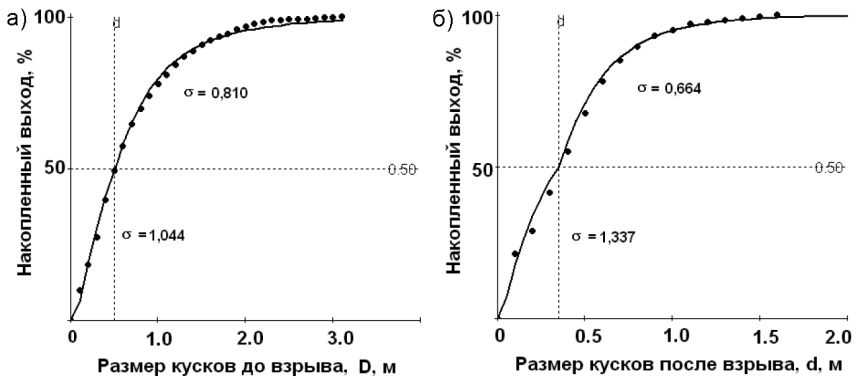

Рис. 5. Интегральные кривые распределения кусков до (а) и после (б) взрыва (при рассечении на 2 части)

вом который проводился на вышележащем горизонте, за счет перебура скважин ниже подошвы уступа. При оценке качества взрывного дробления повышенное значение мелких кусков, по-видимому, связано с наличием ближней и дальней зон действия взрыва, разрушающихся с существенно различными размерами фрагментов.

Для еще более точного приближения теоретической кривой к результатам измерений рассечем область построения на две части по куску d_{50}:

1 часть – куски размером от 0 до d_{50};

2 часть – куски размером более d_{50}, и определим методом наименьших квадратов параметр σ.

Интегральная кривая распределения и параметры σ при таком рассечении представлены на рис. 5.

Очевидно, чем больше расхождение параметра σ нижней и верхней части графика, тем больше зона мелкодисперсного дробления при взрыве и существеннее затраты энергии на переизмельчение породы.

Применение встроенных функций логарифмически нормального распределения в Excel и Mathcad позволяет автоматизировать работу по оценке гранулометрического состава взорванной горной массы и оперативно определять выход негабарита при изменении технологии и параметров взрывных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтеховский Ю.Л.* Модальный анализ горных пород по Делессу–Розивалю–Глаголеву: к истории вопроса / Труды IV Всероссийской научной школы «Математические исследования в кристаллографии, минералогии и петрографии». Апатиты, 27–28 октября 2008 г. / Сост. и ред. Ю.Л. Войтеховский. – Апатиты: Изд-во К & М, 2008. – С. 5–12.

2. *Барон Л.И.*, *Граубиц Ж.К.* Линейный и точечный методы определения кусковатости по фотопланограммам // Известия Карельского и Кольского филиалов Академии наук СССР. – 1958. – № 3. – С. 107–115.

3. *Падуков В.А.*, *Маляров И.П.* Механика разрушения горных пород при взрыве. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 1985. – 128 с.

4. *Парамонов Г.П.*, *Виноградов Ю.И.*, *Каменский А.А.* Распределение продуктов разрушения гранитных массивов // Записки горного института. – 2011. –Т. 189. – С. 146–150. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Симонов Павел Семенович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: rgpv-mg@mail.ru,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 320–327.

UDC 622.235

P.S. Simonov

FEATURES OF DETERMINING AVERAGE DIMENSION AND YIELD OF OVERSIZES UNDER BLASTING IN OPEN PIT MINES

The methods to estimate grain-size distribution in broken rocks and the rock fragmentation quality are analyzed. It is proposed to determine the parameter σ of the logarithmically normal distribution using the least square method. For the more accurate approximation of the theoretical curve of the logarithmically normal distribution to the measured grain-size distribution, it is recommenced to split the plot area into two parts based on the average medium size of rock fragments. The logarithmically normal distribution in-build functions Excel and Mathcad allow automated estimation of grain-size composition of blasted rocks.

Key words: blast, fragmentation, fragment, the average size of a piece, grain-size composition.

AUTHOR

Simonov P.S., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov,
455000, Magnitogorsk, Russia, e-mail: rgpvmg@mail.ru.

REFERENCES

1. Voytekhovskiy Yu. L. *Trudy IV Vserossiyskoy nauchnoy shkoly «Matematicheskie issledovaniya v kristallografii, mineralogii i petrografii». Apatity, 27–28 oktyabrya 2008 g.* Mathematical Studies in Crystallography, Mineralogy and Petrography: IV All-Russian School Transactions. Apatity, October 27–28, 2008), Apatity, Izd-vo K & M, 2008, pp. 5–12.

2. Baron L. I., Graubits Zh. K. *Izvestiya Karel'skogo i Kol'skogo filialov Akademii nauk SSSR*. 1958, no 3, pp. 107–115.

3. Padukov V. A., Malyarov I. P. *Mekhanika razrusheniya gornykh porod pri vzryve* (Mechanics of rock failure under explosion), Irkutsk, Izd-vo IGU, 1985, 128 p.

4. Paramonov G. P., Vinogradov Yu. I., Kamenskiy A. A. *Zapiski gornogo instituta*. 2011, vol. 189, pp. 146–150.

Участники «Недели горняка-2017»