

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЗОРВАННЫХ ПОРОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВЗРЫВАНИЯ

Б.Р. Ракишев¹, А.А. Орынбай¹, А.М. Ауэзова¹, А.Е. Куттыбаев¹

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: b.rakishev@mail.ru

Аннотация: Рассмотрен усовершенствованный аналитический метод определения гранулометрического состава взорванной горной массы при взрывании уступов скважинными зарядами. Он базируется на учете размеров зон интенсивного дробления вокруг скважинного заряда и содержания естественных отдельностей в массиве пород. Радиусы зон интенсивного дробления рассчитываются по заданным физико-механическим свойствам взрывааемых пород и физико-химическим характеристикам применяемых взрывчатых веществ. Гранулометрический состав естественных отдельностей рассчитывается по среднему размеру отдельности в массиве. На гранулометрический состав взорванных горных пород сильное влияние оказывают волна, отраженная от свободных поверхностей массива пород, и также вспучивающее воздействие взрыва заряда ВВ. Этот эффект взрыва учитывается установленным значением коэффициента дополнительного дробления. На базе совместного учета этих влияющих факторов впервые разработан аналитический метод определения каждого класса пород по крупности во взорванной горной массе. Разработана компьютерная программа автоматизированного определения грансостава взорванной горной массы, взаимоувязывающего влияние физико-механических свойств взрывааемых пород, физико-химических характеристик применяемого ВВ и параметров расположения зарядов в массиве пород. Проведены расчеты прогнозируемого гранулометрического состава пород при различных параметрах буровзрывных работ на карьерах Казахстана. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показали высокую степень их идентичности. Такой результат подтверждает, что предлагаемый теоретический подход определения гранулометрического состава взорванных пород учитывает действительный механизм разрушения реального массива пород взрывом. В литературе не приводятся подобные методы расчета гранулометрического состава взорванных пород.

Ключевые слова: предельный радиус взрывной полости, радиусы зон дробления, условное содержание естественных отдельностей, объемы интенсивного разрушения, автоматическое определение гранулометрического состава взорванных пород.

Для цитирования: Ракишев Б. Р., Орынбай А. А., Ауэзова А. М., Куттыбаев А. Е. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С. 83–94. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94.

Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting

B.R. Rakishev¹, A.A. Orynbay¹, A.M. Auezova¹, A.E. Kuttybaev¹

¹ Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: b.rakishev@mail.ru

Abstract: The article describes the improved analytical method of determining grain size composition of broken rocks under blasting. The method takes into account dimension of heavy fragmentation zones around blastholes and content of natural joints in rock mass. The radii of heavy fragmentation zones are calculated using the preset physico-mechanical properties of rocks and physicochemical characteristics of explosives. Grain size compositions of natural joints are calculated using the average size of joints in rock mass. The grain size composition of broken rocks is largely influenced by the wave reflected from free surfaces in rocks and by swelling effect of explosion. The swelling effect of blasting is included in the value of the extra fragmentation coefficient. By means of integration of these influencing factors, the analytical method is developed for the first time to determine every size grade in blasted rock. The software program is designed for automatic determination of grain size composition of blasted rocks by associating influences of physico-mechanical properties of rocks, physicochemical characteristics of explosives and blast design parameters. Using this program, grain size compositions of blasted rocks were calculated at different parameters of blast designs applied in open pit mines in Kazakhstan. Comparison of the theoretical and experimental data showed their high-level identity. This result proves that the proposed theoretical approach to determination of grain size composition of broken rocks takes into account actual mechanism of explosive fracture of real rock mass. Scientific literature contains no information on such calculation methods of grain size composition of broken rocks.

Key words: limit explosion chamber radius, fragmentation zone radius, conditional content of natural joints, heavy fracture volume, automatic determination of grain size composition of broken rocks.

For citation: Rakishev B. R., Orynbay A. A., Auezova A. M., Kuttybaev A. E. Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(8):83-94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94.

Важной фиксируемой технологической характеристикой взорванных горных пород является их гранулометрический состав. Аналитическое определение этого показателя взрыва базируется на установлении размеров радиуса зон мелкого дробления (r_2) трещинообразования (r_1) и высоты зоны интенсивного разрушения (h_a). Как показано в работах [1, 2], объем разрушения пород вокруг взорванного скважинного заряда равняется

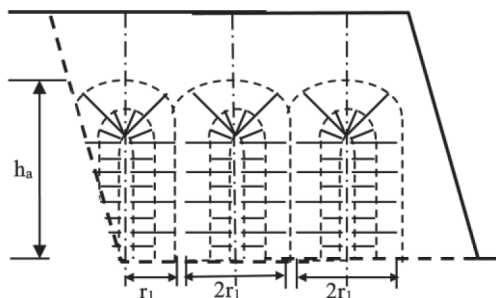


Рис. 1. Размеры зоны интенсивного дробления пород

Fig. 1. The size of the zone of intensive crushing of rocks

объему цилиндра с радиусом и высотой ($h_3 + r_2$) (рис. 1).

Радиус зоны мелкого дробления определяется по формуле:

$$r_2 = r_{np} \left(\frac{\rho_0 c^2}{5\sigma_{сж}} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Радиус зоны радиальных трещин вычисляется по соотношению:

$$r_1 = r_2 \frac{v \sigma_{сж}}{1 + v \sigma_p}. \quad (2)$$

В этих формулах ρ_0 — плотность породы, кг/м³; c — скорость звука в породе, м/с; $\sigma_{сж}$ — предел прочности на сжатие, МПа; σ_p — предел прочности на растяжение, МПа; v — коэффициент Пуассона; r_{np} — предельный радиус полости, м.

Предельный радиус полости вычисляется по следующей формуле:

$$r_{np} = \overline{r_{np}} \cdot r_0, \quad (3)$$

где r_0 — радиус скважины; $\overline{r_{np}}$ — относительный предельный радиус полости. Он определяется по формуле:

$$\bar{r}_{np} = (P_H / P_c)^{1/4}, \quad (4)$$

где P_H — начальное давление продуктов детонации, МПа; P_c — прочностная характеристика породы, МПа.

Начальное давление продуктов детонации находится по формуле:

$$P_H = \frac{1}{8} \rho_{вв} D^2, \quad (5)$$

где $\rho_{вв}$ — плотность взрывчатого вещества, кг/м³; D — скорость детонации ВВ, м/с.

Прочностная характеристика породы определяется по формуле:

$$P_c = \sigma_{сж} \left(\frac{\rho_0 c^2}{\sigma_{сж}} \right)^{1/4}, \quad (6)$$

Зависимости (1) и (2) показывают, что зоны разрушения полностью определяются упругими, прочностными свойствами среды, детонационными и энергетическими характеристиками ВВ. Они учитывают комплексное влияние всех главных факторов на результаты взрыва.

В соответствии с механизмом разрушения пород объем всей интенсивно раздробленной породы, приходящийся на один скважинный заряд, составит:

$$V_{др} = (1+k) \pi r_1^2 (h^3 + 1,3r_2), \quad (7)$$

где k — коэффициент, учитывающий долю разрушенного объема за счет отраженной волны растяжения и вспучивающего действия взрыва (зависит от упругих и структурных свойств пород в массиве и условий взрыва), $k = 1$.

В зависимости от размеров кусков породы взорванная горная масса обычно делится на 7 классов. К первому классу относятся куски размером до 0,2 м, ко второму классу куски размером 0,21–0,40 м, к третьему классу — куски размером 0,41–0,60 м, к четвертому классу — куски размером 0,61–0,80 м, и так до седьмого класса, к которому относятся отдельные размером более 1,21 м [2–4].

Замерами, проведенными по экспериментальным взрывам [2], установлено, что при использовании скважин диаметром $d_0 = 0,25$ м весь объем зоны мелкого дробления состоит из кусков размером до 0,20 м, а зона радиальных трещин содержит куски 0,17–0,50 м. При рациональном размещении зарядов в массиве наиболее распространенный размер кусков на участке между взорванными скважинами обычно не превышает 0,60 м [3].

Эти данные дают основание считать, что объем интенсивного дробления ($V'_{др}$) состоит из отдельностей первых трех классов фракций.

Принимая во внимание приведенные выше данные, к первому классу (0–0,2 м) следует отнести весь объем породы в зоне раздавливания и одну треть объема породы в зоне радиальных трещин (с учетом равной вероятности выходов фракций), а ко второму (0,21–0,40 м) и третьему (0,41–0,60 м) классам — соответственно по одной трети упомянутого объема. Вычисление этих объемов не представляет трудности, т.к. первый объем — объем цилиндра с радиусом r_2 , второй объем — разность объемов цилиндров соответственно с радиусом r_1 и r_2 и т.д. Такое расположение интенсивно раздробленных кусков пород по классам крупности показано на рис. 2.

На основе изложенного, для объемов пород первых трех классов крупности в зоне интенсивного дробления имеем:

$$\begin{aligned} V''(x_1) &= \pi r_2^2 (h_3 + r_2) + \\ &+ \frac{1}{3} \pi (r_1^2 - r_2^2) (h_3 + r_2) - \\ &- \frac{2}{3} r_2^3 \operatorname{tg} \alpha - \frac{2}{9} (r_1^3 - r_2^3) \operatorname{tg} \alpha; \\ V''(x_2) &= V''(x_3) = \\ &= \frac{1}{3} \pi (r_1^2 - r_2^2) (h_3 + r_2) - \frac{2}{9} (r_1^3 - r_2^3) \operatorname{tg} \alpha \end{aligned} \quad (8)$$

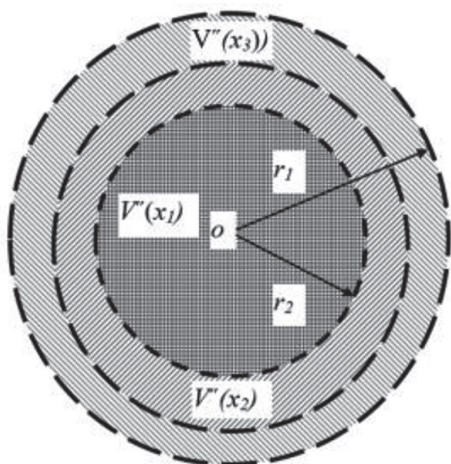


Рис. 2. Расположение классов пород по крупности $V''(x_3), V''(x_2), V''(x_1)$ в зоне интенсивного дробления

Fig. 2. Location of rock classes by size $V''(x_3), V''(x_2), V''(x_1)$ in the zone of intensive crushing

где $V''(x_1), V''(x_2), V''(x_3)$ — объемы пород соответственного первого (x_1), второго (x_2) и третьего (x_3) классов крупности в зоне интенсивного дробления массива; α — угол откоса уступа.

Объем породы, пронизанный радиальными трещинами в тыльной части массива, представляет собой отрезок цилиндра (рис. 3). Он не входит в состав отбитой породы и рассчитывается по формуле [2]:

$$V_{o.u} = 2 / 3 r_1^3 \text{tg} \alpha.$$

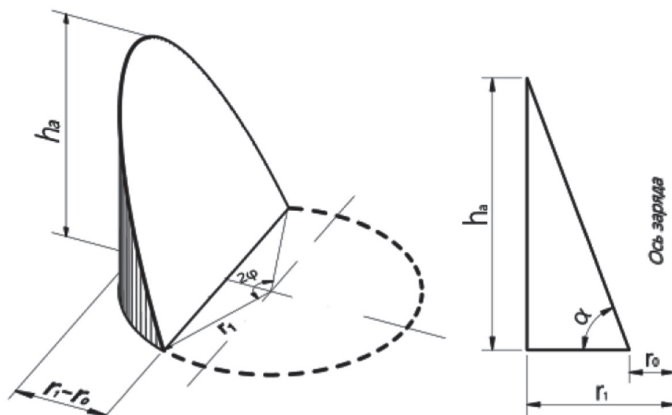


Рис. 3. Объем отрезка цилиндра в тыльной части массива

Fig. 3. The volume of the segment of the cylinder in the back of the array

Весь объем интенсивно раздробленной породы равняется сумме объемов пород первых трех классов крупности, т.е.:

$$\begin{aligned} V_u &= V''(x_1) + V''(x_2) + V''(x_3) = \\ &= \pi r_1^2 (h_3 + r_2) - \frac{2}{3} r_1^3 \text{tg} \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

Во всей взорванной горной массе к перечисленным классам крупности пород необходимо добавлять соответствующие естественные отдельности, входящие в состав остальной части взрываеваемого блока. Эти объемы пропорциональны их содержанию в массиве (см. табл. 1). Данные табл. 1 установлены в работе [5]. Таким образом, объемы первых трех классов во всей взорванной породе определяются по формулам:

$$\begin{aligned} V'(x_1) &= (1 + k) \cdot \\ &\cdot [V''(x_1) + \rho(x_1)V''(x_2) + \rho(x_1)V''(x_3)] + \\ &+ \rho(x_1)[V - (1 + k)V_u] \\ V'(x_2) &= (1 + k) \cdot \\ &\cdot [V''(x_2) + \rho(x_2)V''(x_3) - \rho(x_1)V''(x_2)] + \\ &+ \rho(x_2)[V - (1 + k)V_u] \\ V'(x_3) &= (1 + k) \cdot \\ &\cdot [V''(x_3) - \rho(x_1)V''(x_3) - \rho(x_2)V''(x_3)] + \\ &+ \rho(x_3)[V - (1 + k)V_u] \end{aligned} \quad (10)$$

Таблица 1

Гранулометрический состав естественных отдельностей в массивах пород Сарбайского и Куржункульского карьеров
Granulometric composition of natural separations in the rock massifs of the Sarbai and Kurzshunkulsky quarries

| Наименование пород | Массивы по блочности (степень трещиноватости) | Содержание в массиве (%) естественных отдельностей размером (м) | | | | | | |
|--|---|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | | <0,20 | 0,21–0,40 | 0,41–0,60 | 0,61–0,80 | 0,81–1,00 | 1,01–1,20 | >1,21 |
| Альбитофир, андезитовые порфириды | Мелкоблочные (чрезвычайно трещиноватые) | 67,84 | 21,83 | 7,03 | 2,26 | 0,73 | 0,23 | 0,08 |
| Мартиты, туфы диорит-порфиридов | Среднеблочные (сильнотрещиноватые) | 48,83 | 25,22 | 13,02 | 6,73 | 3,47 | 1,79 | 0,93 |
| Богатые и бедные магнетитовые руды, диабазовые порфириды | Крупноблочные (среднетрещиноватые) | 30,59 | 22,23 | 16,16 | 11,75 | 8,54 | 6,21 | 4,51 |
| Роговики, массивный известняк | Весьма крупноблочные (малотрещиноватые) | 19,92 | 17,66 | 15,66 | 13,88 | 12,31 | 10,91 | 9,67 |

где V — объем породы отбиваемого слоя массива; $V''(x_j)$ — объем интенсивно раздробленной породы j -й фракции; $V'(x_j)$ — весь объем породы j -й фракции после взрыва; $p(x_j)$ — содержание j -й фракции в массиве, дол. ед.

Формулы (10) существенно отличаются от ранее предположенных в работе [1, 2]. Из них следует, что объем пород

первого класса крупности во всей взорванной породе состоит из объемов таковых, содержащихся в первом, втором и третьем классах в зоне интенсивного дробления и части объема таких классов во всей взорванной породе. Объем пород второго класса крупности состоит из суммы объемов этих классов во второй и третьей зонах интенсивного дробле-

Таблица 2

Условный гранулометрический состав отдельностей в массиве пород Сарбайского и Куржункульского карьеров
Conditional granulometric composition of individualities in the array of rocks of the Sarbai and Kurzshunkulsky quarries

| Классы массивов по блочности | Массивы по блочности (степень трещиноватости) | Условное содержание в массиве (%) отдельностей размером (м) | | | | | | |
|------------------------------|---|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | <0,20 | 0,21–0,40 | 0,41–0,60 | 0,61–0,80 | 0,81–1,01 | 1,01–1,20 | >1,21 |
| | | $q(x_1)$ | $q(x_2)$ | $q(x_3)$ | $q(x_4)$ | $q(x_5)$ | $q(x_6)$ | $q(x_7)$ |
| I | Мелкоблочные (чрезвычайно трещиноватые) | 67,84 | 21,83 | 7,03 | 2,44 | 0,6 | 0,19 | 0,06 |
| II | Среднеблочные (сильнотрещиноватые) | 48,83 | 25,22 | 13,02 | 7,59 | 3,05 | 1,57 | 0,69 |
| III | Крупноблочные (среднетрещиноватые) | 30,59 | 22,23 | 16,16 | 13,88 | 7,95 | 5,78 | 3,38 |
| IV | Весьма крупноблочные (малотрещиноватые) | 19,92 | 17,66 | 15,66 | 16,95 | 11,96 | 10,6 | 7,25 |

ния за вычетом объема пород первого класса и с прибавлением к ним части второго класса во всей взорванной породе. Объем пород третьего класса рассчитывается по аналогичной схеме.

Классы пород по крупности более 0,61 м образуются вследствие вспучивающего действия взрыва и преодоления сил сцепления между естественными отдельностями, т.е. за счет разваливания взрываеваемого блока на такие отдельности. В третьей стадии взрыва куски пород упомянутых фракций при перемещении соударяются с другими, что приводит к сокращению их доли в общей массе. Относительно перераспределения крупных фракций в третьей стадии взрыва на основании анализа промышленных и экспериментальных взрывов можно принять следующие предположения [1, 2].

Куски размером более 1,21 м в результате соударения в общем объеме сократятся на одну четвертую (1/4) своего первоначального значения (см. формулу (11), табл. 2). Раздробленная часть этих кусков распределяется по нижнему классу (0,61–1,2 м), т.е. к нему прибавляется 1/4 часть содержания самой крупной фракции (см. формулу (11)).

Процентное содержание естественных отдельностей в шестом классе (1,01–1,2 м) также уменьшится на 1/4 от своего первоначального значения (см. формулу (11)). Его раздробленная часть прибавляется к нижнему классу (0,61–1,0 м). Иначе говоря, доля этого класса увеличится еще на 1/4 содержания предыдущей фракции. Доля естественных отдельностей в пятом классе (0,81–1,0) уменьшится на одну четвертую первоначального значения (см. формулу (7)). Эта доля прибавится к четвертому классу крупности (0,61–0,8).

Таким образом, в результате взаимного соударения крупных кусков при взрыве в классах выше 0,61 м происходит некоторое их перераспределение

во взорванном объеме. Это состояние учитывается их условным содержанием в массиве пород. На основе вышеизложенного, новое содержание естественных отдельностей в массиве, т.е. их условное содержание, определяется по зависимостям:

$$\begin{aligned} q(x_1) &= p(x_1); q(x_2) = p(x_2); q(x_3) = p(x_3); \\ q(x_4) &= p(x_4) + \frac{1}{4} p(x_5); \\ q(x_5) &= \frac{3}{4} p(x_5) + \frac{1}{4} p(x_6); \\ q(x_6) &= \frac{3}{4} p(x_6) + \frac{1}{4} p(x_7); q(x_7) = \frac{3}{4} p(x_7). \end{aligned} \quad (11)$$

Значения $q(x_j)$, вычисленные по формулам (11), приведены в табл. 2.

Объемы пород крупных классов (выше 0,61 м) во всей взорванной горной массе прямо пропорциональны разности объемов взрываеваемого блока и интенсивно раздробленных пород в нем. Коэффициент пропорциональности равен условному содержанию отдельностей в массиве пород. В целом, для классов искоемых объемов ($j \geq 4$) имеем:

$$V'(x_j) = q(x_j) [V - (1+k)V_u]. \quad (12)$$

Для вычисления гранулометрического состава всей взорванной породы достаточно разделить полученные объемы (10) и (12) на объем взрываеваемого блока. Тогда содержание отдельных фракций в объеме первых трех классов устанавливается соотношением ($i \leq 3$):

$$p'(x_i) = V'(x_i) / V, \quad (13)$$

а содержание фракций в последующих классах ($j \geq 4$) определяется по выражению:

$$p'(x_j) = \frac{q(x_j)}{V} [V - (1+k)V_u], \quad (14)$$

где $p'(x_j)$ — содержание j -й фракции в развале, дол. ед.; $q(x_j)$ — условное содержание j -й фракции в массиве пород, дол. ед.

| | | | |
|---|---------|---|---------|
| Прочностная характеристика породы, МПа | 457,88 | Число частей заряда | 2,88 |
| Начальное давление продуктов детонации, МПа | 1293,75 | Масса заряда, кг | 706,18 |
| Коэффициент динамичности | 1,5 | Скорость перемещения стенок полости, м/с | 105 |
| Относительный предельный радиус полости | 1,3 | Время замедления, с | 0,0287 |
| Предельный радиус полости, м | 0,16 | Удельный расход ВВ, кг/м ³ (идеальный) | 0,5852 |
| Радиус зоны мелкого дробления, м | 1,84 | Выход горной массы с одного пог. м скважины (идеальный) | 53,6 |
| Радиус зоны радиальных трещин, м | 3,02 | Содержание фракции 1 класса в развале (%) | 79,5115 |
| Линия сопротивления по подошве уступа, м | 9,06 | Содержание фракции 2 класса в развале (%) | 15,2464 |
| Расстояние между скважинами, м | 7,59 | Содержание фракции 3 класса в развале (%) | 3,9952 |
| Расстояние между рядами скважин, м | 7,59 | Содержание фракции 4 класса в развале (%) | 0,9229 |
| Длина заряда над уровнем подошвы уступа, м | 11,61 | Содержание фракции 5 класса в развале (%) | 0,2286 |
| Длина незаряженной части скважины, м | 8,39 | Содержание фракции 6 класса в развале (%) | 0,0727 |
| Длина перебура скважины, м | 2,51 | Содержание фракции 7 класса в развале (%) | 0,0227 |
| Длина заряда в скважине, м | 14,12 | | |
| Глубина скважины, м | 22,51 | | |

Рис. 4. Автоматизированный расчет параметров БВР и грансостава взорванной горной массы в альбитофировых рудах, блочности В-1

Fig. 4. Automated calculation of drilling and blasting parameters and composition of the blasted rock mass in albitophyre ores, blockiness B-1

Известно, что система значений $p'(x)$ представляет собой гранулометрический состав взорванной горной массы.

Таким образом, по выражениям (13)–(14) при заданных физико-механических, структурных свойствах пород, детонационных, энергетических характеристиках ВВ, параметрах и способе взрывания гранулометрический состав взрывающей руды и породы рассчитывается заранее. Отсюда следует, что, изменяя один или одновременно несколько из влияющих факторов, можно активно управлять кусковатостью взрывающей горной массы.

Предложенный теоретический подход к определению гранулометрического состава взорванных горных пород является инновационным и принципиально

отличается от известных в литературе [7–12]. Как видно из выражений (13), (14) гранулометрический состав взорванных горных пород сильно зависит от содержания естественных отдельностей в массиве пород. Поэтому установление категорий блочности массивов пород или категорий взрываемости пород на карьерах является исключительно важной задачей [5, 8, 11].

Для автоматизированного определения грансостава взорванной породы была разработана программа в среде Microsoft Visual Studio 2017. Эта программа включает в себя набор программных средств для организации и проведения автоматических расчетов, обработки и представления информации, создания от-

| | | | |
|---|---------|---|---------|
| Прочностная характеристика породы, МПа | 1151,57 | Число частей заряда | 3,11 |
| Начальное давление продуктов детонации, МПа | 3312 | Масса заряда, кг | 762,44 |
| Коэффициент динамичности | 1,43 | Скорость перемещения стенок полости, м/с | 168 |
| Относительный предельный радиус полости | 1,3 | Время замедления, с | 0,0206 |
| Предельный радиус полости, м | 0,16 | Удельный расход ВВ, кг/м ³ (идеальный) | 0,4789 |
| Радиус зоны мелкого дробления, м | 1,26 | Выход горной массы с одного пог. м скважины (идеальный) | 69,56 |
| Радиус зоны радиальных трещин, м | 3,46 | Содержание фракции 1 класса в развале (%) | 49,0362 |
| Линия сопротивления по подошве уступа, м | 10,41 | Содержание фракции 2 класса в развале (%) | 24,8715 |
| Расстояние между скважинами, м | 8,71 | Содержание фракции 3 класса в развале (%) | 14,5581 |
| Расстояние между рядами скважин, м | 8,71 | Содержание фракции 4 класса в развале (%) | 5,1629 |
| Длина заряда над уровнем подошвы уступа, м | 12,36 | Содержание фракции 5 класса в развале (%) | 2,9589 |
| Длина незаряженной части скважины, м | 7,64 | Содержание фракции 6 класса в развале (%) | 2,1511 |
| Длина перебура скважины, м | 2,89 | Содержание фракции 7 класса в развале (%) | 1,2577 |
| Длина заряда в скважине, м | 15,25 | | |
| Глубина скважины, м | 22,89 | | |

Рис. 5. Автоматизированный расчет параметров БВР и грансостава взорванной горной массы в диорит-порфиритовых рудах, блочности Б-2

Fig. 5. Automated calculation of drilling and blasting parameters and composition of the blasted rock mass in diorite-porphyrite ores, блочности B-2

четов о результатах исследований и визуализации в режиме реального времени [13–15].

Примеры применения программы для автоматизированного определения гранулометрического состава взорванной горной массы для конкретных пород Сарбайского карьера при рациональных параметрах БВР приведены ниже. При расчетах приняты рациональные параметры расположения зарядов ВВ в 20 метровом уступе.

Анализ фактически измеренного и автоматизированного определения гранулометрического состава взорванных горных пород Сарбайского и Куржункульского карьеров показывает, что их распределение лежит в допустимых пределах.

Среднее отклонение (абсолютное значение) фракций размером до 0,2 м в среднеблочных массивах (Б-2) составляет не более 5%, в крупноблочных массивах (Б-3) — не более 1,0 %. Среднее отклонение крупных фракций (> 1,21 м) от расчетного не превышает: в среднеблочных породах (Б-2) — 0,5%, в крупноблочных породах (Б-3) — 0,3%.

В мелкоблочных массивах пород (Б-1) выход фракции размером меньше 0,20 находится на уровне 75–80%, выход негабаритов практически отсутствует (0,02%). В среднеблочных массивах пород (Б-2) эти показатели соответственно имеют значения 60–65% и 0,25%. В крупноблочных массивах пород (Б-3) они находятся в пределах 50–55% и 1,0–1,3%.

| | | | |
|---|---------|---|---------|
| Прочностная характеристика породы, МПа | 842,94 | Число частей заряда | 3,03 |
| Начальное давление продуктов детонации, МПа | 2416,44 | Масса заряда, кг | 743,17 |
| Коэффициент динамичности | 1,45 | Скорость перемещения стенок полости, м/с | 143,5 |
| Относительный предельный радиус полости | 1,3 | Время замедления, с | 0,0225 |
| Предельный радиус полости, м | 0,16 | Удельный расход ВВ, кг/м ³ (идеальный) | 0,5387 |
| Радиус зоны мелкого дробления, м | 1,4 | Выход горной массы с одного пог. м скважины (идеальный) | 60,8 |
| Радиус зоны радиальных трещин, м | 3,22 | Содержание фракции 1 класса в развале (%) | 63,639 |
| Линия сопротивления по подошве уступа, м | 9,69 | Содержание фракции 2 класса в развале (%) | 22,3055 |
| Расстояние между скважинами, м | 8,11 | Содержание фракции 3 класса в развале (%) | 9,2367 |
| Расстояние между рядами скважин, м | 8,11 | Содержание фракции 4 класса в развале (%) | 2,8315 |
| Длина заряда над уровнем подошвы уступа, м | 12,18 | Содержание фракции 5 класса в развале (%) | 1,1367 |
| Длина незаряженной части скважины, м | 7,82 | Содержание фракции 6 класса в развале (%) | 0,587 |
| Длина перебура скважины, м | 2,69 | Содержание фракции 7 класса в развале (%) | 0,2599 |
| Длина заряда в скважине, м | 14,86 | | |
| Глубина скважины, м | 22,69 | | |

Рис. 6. Автоматизированный расчет параметров БВР и грансостава взорванной горной массы в магнетитовых рудах богатых, блочности В-3

Fig. 6. Automated calculation of drilling and blasting parameters and composition of the blasted rock mass in rich magnetite ores, блочности В-3

В весьма крупноблочных массивах пород (В-4) — 40—45% и 2,5—3,0%.

Распределение между рассмотренными фракциями (менее 0,2 и более 1,21 м) во взорванной горной массе носит различный характер. Их содержание увеличивается с ростом блочности массива пород. Такая закономерность имеет место в реальных условиях горных работ.

В целом, расчетный и фактический грансоставов взорванных пород находится в пределах допустимых отклонений. Это служит доказательством того, что принятые при вычислении объемов пород различных классов предположения соответствуют действительному механизму разрушения реального массива пород.

Выводы

- Гранулометрический состав взорванных горных пород предопределяется объемом зоны интенсивного дробления пород, помноженным на коэффициент, учитывающий долю разрушения за счет отраженной волны напряжения и вспучивающего действия взрыва и процентным содержанием естественных отдельных частей в массиве пород.

- Радиусы зон интенсивного дробления рассчитываются по предложенным формулам при заданных физико-механических свойствах взрывааемых пород, физико-химических характеристиках применяемого ВВ.

- Установлены новые закономерности формирования кусков пород раз-

| | | | |
|---|---------|---|---------|
| Прочностная характеристика породы, МПа | 1151,57 | Число частей заряда | 3,11 |
| Начальное давление продуктов детонации, МПа | 3312 | Масса заряда, кг | 762,44 |
| Коэффициент динамичности | 1,43 | Скорость перемещения стенок полости, м/с | 168 |
| Относительный предельный радиус полости | 1,3 | Время замедления, с | 0,0206 |
| Предельный радиус полости, м | 0,16 | Удельный расход ВВ, кг/м ³ (идеальный) | 0,4789 |
| Радиус зоны мелкого дробления, м | 1,26 | Выход горной массы с одного пог. м скважины (идеальный) | 69,56 |
| Радиус зоны радиальных трещин, м | 3,46 | Содержание фракции 1 класса в развале (%) | 49,0362 |
| Линия сопротивления по подошве уступа, м | 10,41 | Содержание фракции 2 класса в развале (%) | 24,8715 |
| Расстояние между скважинами, м | 8,71 | Содержание фракции 3 класса в развале (%) | 14,5581 |
| Расстояние между рядами скважин, м | 8,71 | Содержание фракции 4 класса в развале (%) | 5,1629 |
| Длина заряда над уровнем подошвы уступа, м | 12,36 | Содержание фракции 5 класса в развале (%) | 2,9589 |
| Длина незаряженной части скважины, м | 7,64 | Содержание фракции 6 класса в развале (%) | 2,1511 |
| Длина перебура скважины, м | 2,89 | Содержание фракции 7 класса в развале (%) | 1,2577 |
| Длина заряда в скважине, м | 15,25 | | |
| Глубина скважины, м | 22,89 | | |

Рис. 7. Автоматизированный расчет параметров БВР и грансостава взорванной горной массы в роговиковых рудах, блочности Б-4

Fig. 7. Automated calculation of drilling and blasting parameters and composition of the blasted rock mass in corniferous ores, блочности В-4

личных фракций во взорванной горной массе.

- Создана компьютерная программа автоматизированного определения грансостава взорванной горной массы,

взаимоувязывающего влияние физико-механических свойств взрываеваемых пород, физико-химических характеристик применяемого ВВ и параметров расположения зарядов в массиве пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rakishev B. R., Auezova A. M., Rakisheva Z. B. The specification of granulometric composition of natural jointing in the rock massif by their average size / Proceedings of the 9th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction. Beijing, China, 2014. Pp. 274–282.
2. Ракишев Б. Р. Автоматизированное проектирование и производство массовых взрывов на карьерах. — Алматы: Гылым, 2016. — 340 с.
3. Репин Н. Я. Подготовка и экскавация вскрышных пород угольных разрезов. — М., 1978. — 256 с.
4. Проектирование взрывных работ в промышленности / Под ред. Б.Н. Кутузова. — М.: Недра, 1983. — 78 с.
5. Ракишев Б. Р., Ауэзова А. М., Казангапов А. Е. Структурно-иерархические модели массивов горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 4. — С. 128–138. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-128-138.

6. Rakishev B. R., Rakisheva Z. B. Theoretical estimation of granulometric structure of exploded mining rocks at the quarries / Proceedings of the Sixteenth international Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. (MPES 2007) and the Tenth International Symposium on 1 Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP 2007). Bangkok, Toyland, 2007. Vol. 1. Pp. 908–912.

7. Галушко Ф. И., Комячин А. О., Мусатова И. Н. Управление качеством взрывной подготовки горной массы на основе оптимизации параметров БВР // Взрывное дело. — 2017. — № 118/75. — С. 140–151.

8. Викторов С. Д., Казаков Н. Н., Лапиков И. Н., Шляпин А. В. Проектирование БВР в карьерах // Взрывное дело. — 2014. — № 111/68. — С. 80–91.

9. Жариков И. Ф. Регулирование степени дробления при взрывании высоких уступов // Взрывное дело. — 2014. — № 111/68. — С. 93–100.

10. Виноградов Ю. И. Методика оценки эффективности дробления массива горных пород различными типами ВВ // Взрывное дело. — 2010. — № 104/61. — С. 91–97.

11. Дугартыренов А. В., Ким С. И., Должиков К. И., Петров А. Н., Марков В. С. Взрывное разрушение горных пород разнопрочных массивов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 11. — С. 372–376.

12. Вохмин С. А., Курчин Г. С., Кирсанов А. К. Процесс разрушения породы при взрыве заряда взрывчатого вещества // Вестник ЗабГУ. — 2015. — № 11 (126). — С. 10–22.

13. NET Framework Guide [электронный ресурс]. — режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/index>

14. Lars Powers, Mike Snell. Microsoft Visual Studio 2015 Unleashed, 3rd Edition — Indianapolis, Imprint Sams, 2015. — p. 1320.

15. Getting Started (WPF) [электронный ресурс]. — режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/wpf/getting-started/> **МАБ**

REFERENCES

1. Rakishev B. R., Auezova A. M., Rakisheva Z. B. The specification of granulometric composition of natural jointing in the rock massif by their average size. *Proceedings of the 9th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction*. Beijing, China, 2014. Pp. 274–282.

2. Rakishev B. R. *Avtomatizirovannoe proektirovanie i proizvodstvo massovykh vzryvov na kar'erakh* [Automatic blasting design and shooting in open pit mines], Almaty, Fylym, 2016, 340 p.

3. Repin N. Ya. *Podgotovka i ekskavatsiya vskryshnykh porod ugol'nykh razrezov* [Overburden preparation and stripping in open pit coal mines], Moscow, 1978, 256 p.

4. *Proektirovanie vzryvnykh rabot v promyshlennosti*. Pod red. B. N. Kutuzova [Blasting design engineering in industry. B. N. Kutuzov (Ed.)], Moscow, Nedra, 1983, 78 p.

5. Rakishev B. R., Auezova A. M., Kazangapov A. E. Hierarchical rock mass structure models. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 4, pp. 128–138. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-4-0-128-138. [In Russ].

6. Rakishev B. R., Rakisheva Z. B. Theoretical estimation of granulometric structure of exploded mining rocks at the quarries. *Proceedings of the Sixteenth international Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. (MPES 2007) and the Tenth International Symposium on 1 Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP 2007)*. Bangkok, Toyland, 2007. Vol. 1. Pp. 908–912.

7. Galushko F. I., Komyachin A. O., Musatova I. N. Rock fragmentation quality control by optimization of blast design parameters. *Vzryvnoe delo*. 2017, no 118/75, pp. 140–151. [In Russ].

8. Viktorov S. D., Kazakov N. N., Lapikov I. N., Shlyapin A. V. Drilling and blasting design engineering in open pit mines. *Vzryvnoe delo*. 2014, no 111/68, pp. 80–91. [In Russ].

9. Zhariikov I. F. Rock fragmentation adjustment in high bench blasting. *Vzryvnoe delo*. 2014, no 111/68, pp. 93–100. [In Russ].

10. Vinogradov Yu. I. Estimation procedure of rock fragmentation efficiency using different explosives. *Vzryvnoe delo*. 2010, no 104/61, pp. 91–97. [In Russ].

11. Dugartysrenov A. V., Kim S. I., Dolzhikov K. I., Petrov A. N., Markov V. S. Blasting of different-strength rock masses. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 11, pp. 372–376. [In Russ].

12. Vokhmin S. A., Kurchin G. S., Kirsanov A. K. Process of rock fracture under blasting. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015, no 11 (126), pp. 10–22. [In Russ].

13. *NET Framework Guide*, available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/index>

14. Lars Powers, Mike Snell. *Microsoft Visual Studio 2015 Unleashed*, 3rd Edition — Indianapolis, Imprint Sams, 2015. p. 1320.

15. *Getting Started (WPF)*, available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/wpf/getting-started/>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ракишев Баян Ракишевич*¹ — академик НАН РК,

доктор технических наук, профессор, e-mail: b.rakishev@mail.ru,

*Ауэзова Алма Мухамбетжановна*¹ — кандидат технических наук, доцент,

*Куттыбаев Айдар Ермакалиевич*¹ — кандидат технических наук,

старший преподаватель,

*Орынбай Асфандияр Айтказыулы*¹ — докторант, старший преподаватель,

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан.

Для контактов: Ракишев Б.Р., e-mail: b.rakishev@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*B.R. Rakishev*¹, Academician of National Academy of Sciences

of the Republic of Kazakhstan, Doctor of Technical Sciences, Professor,

e-mail: b.rakishev@mail.ru,

*A.M. Auezova*¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

*A.E. Kuttybaev*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,

*A.A. Orynbay*¹, PhD student, Senior Lecturer,

¹ Satpayev Kazakh National Research Technical University, 050013, Almaty, Kazakhstan.

Corresponding author: B.R. Rakishev, e-mail: b.rakishev@mail.ru.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ПРЕСС-КЛАССИФИКАТОРА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

(№ 1201/08–19 от 25.06.2019; 8 с.)

*Кондратенко Валерий Ерофеевич*¹ — канд. техн. наук, доцент,

*Девятьярова Виктория Викторовна*¹ — доцент, e-mail: vikdev@yandex.ru,

¹ НИТУ «МИСиС».

Рассмотрен расчет на прочность классификационного барабана пресс-классификатора для разделения слабых горных пород. Для определения внутренних силовых факторов статически неопределимой системы использован метод сил. В результате приводятся формулы для определения толщины стенки барабана.

Ключевые слова: барабан, пресс-классификатор, метод сил, расчет на прочность, горные породы.

STRENGTH CALCULATION OF PRESS-CLASSIFIER FOR SEPARATION OF WEAK ROCKS

*V.E. Kondratenko*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

*V.V. Devyat'yarova*¹, Assistant Professor, e-mail: vikdev@yandex.ru,

¹ National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

Present article reviews the structural design of the screw-type classifier's drum for weak rocks classification. The method of redundant reactions was used for internal forces calculations of statically indeterminate systems. The research results present formulas for identification of the drum's wall thickness.

Key words: drum, screw-type classifier, method of redundant reactions, strength calculations, rocks.