

ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗАРЯДОВ ВВ И КУСКОВАТОСТЬЮ ГОРНЫХ ПОРОД ВО ВЗРЫВНОМ РАЗВАЛЕ

Выполнены исследования расчетных формул для определения удельного расхода взрывчатых веществ (ВВ) и параметров расположения вертикальных удлиненных зарядов на уступе, в зависимости от свойств горных пород и ВВ, а также с учетом размера прогнозируемого куска в развале пород и среднего размера естественных блоков в массиве.

Проблема и ее связь с практическими задачами. Кусковатость разрушенных взрывом горных пород формируется существующими паспортами буровзрывных работ, и их соблюдением, а также параметрами часто изменяющимися: линией сопротивления по подошве перед первым рядом (ЛСПП), завышениями по подошве, высотой уступа, а также вариацией свойств и параметров средств инициирования и ВВ. Все вместе взятое приводит к значительным колебаниям качества конечного результата [7]. Конечный результат оказывается неопределенным, размытым еще и потому, что изначально, в практике работы железорудных карьеров считается несущественным, второстепенным. В отчетных документах присутствует один показатель по кусковатости - выход негабарита по карьере в целом. В то же время есть экскаваторные забои где негабарита нет совсем, есть также такие, где его мало, а многие забои завалены негабаритными кусками. Последнее снижает производительность погрузки горных пород, их транспортирования и первичного механического дробления, иногда приводит к забутовке дробилки, т. е. к аварийной ситуации. Интенсивно изнашивается также погрузочное оборудование – экскаваторы.

Затраты на их техническое обслуживание, плановые и аварийные ремонты резко возрастают, что в громадном информационном потоке формируемом работой карьера часто остается само собой разумеющимся, как обычная рабочая ситуация: ломается - будем ремонтировать. При этом возрастают потери предприятия связанные с аварийными простоями. Виной всему размытость, неопределенность информации о крупности дробления горных пород.

Та информация о выходе негабарита в отчетных документах также далека от точности, так как формируется на основе затрат на ликвидацию негабарита, а не на конкретных его измерениях. Практически мало формул и расчетных методик по определению показателей кусковатости.

Анализ публикаций. За рубежом создано много компьютерных программ по расшифровке фотографий поверхности развала для установления характера распределения раздробленного продукта по фракциям крупности. Известны, например: SPACS, TUCIPS, FRAGSCAN, SPLIT, FRAQUALYST, WIPFRAQ [1-6]. Характерно, что в описаниях для пользователя говорится о необходимости ручного редактирования с помощью мыши тех мест на цифровых изображениях, где один кусок переходит в другой. Необходимость подобной работы объясняется в основном широким диапазоном изменения условий фотографирования: освещенности в зависимости от времени года, суток, погодных условий, а также масштабным фактором и перспективностью изображения по его высоте.

Создана подобная программа также и в нашем университете. Не учитывается при этом, такой факт, что поверхность развала на 65-80 % представлена результатом работы первого ряда скважин, условия взрывания которого сильно усложнены и по этой причине результаты всегда хуже, чем в последующих рядах, потому возникает необходимость корректировки результатов полученных по поверхности развала по их сути. Кроме того, в крепких, но хрупких породах, под действием отраженной волны, поверхность развала представлена мелочью, а в более вязких - всегда крупными кусками. Получается, что сама поверхность развала часто не является представительной по информационной ценности.

Таким образом, компьютерный анализ требует методической доработки. Кроме того, на ГОКах Кривбасса в отчетных документах, самый ценный показатель кусковатости - выход негабарита всегда менее 1 %. Фактически в разных забоях он колеблется в пределах 0,1-1,5 %, иногда достигая 4-6 %. Чтобы найти эту «иголку» в «стоге сена», т.е. во взрывном развале, нужно перелопатить не мерянное количество фотоотпечатков, чтобы обеспечить точное определение столь малых величин, согласно теории вероятности и надежности [7].

Постановка задачи. Необходимо наладить постоянный поштучный учет негабарита, отнесенный, например, к 1000 м³ отгрузки по каждому экскаваторному забою силами работников рудника. Полученная конкретная информация о содержании одной фракции крупности - негабаритной, позволит расчетным методом, с помощью уравнения Розина-Рамлера, установить размер среднего куска в развале горных пород и остальных фракций крупности гранулометрического состава [8]. Сведения о конечном результате дробления позволят наладить обратную связь с параметрами буровзрывных работ, обеспечившими этот результат, а также с соблюдением этих параметров и навести порядок в этом участке работ [9]. Точная информация о выходе негабарита по каждому экскаваторному забою - та ниточка, потянув за которую можно повысить культуру производства. Делать это нужно силами карьера и ежедневно. Такой подход окажется менее трудоемким, чем установление кусковатости по фотографиям.

Изложение материала и результаты. Удельный расход - количество ВВ, приходящееся на единицу объема горных пород, обеспечивает достижение поставленных технологических целей, например, рыхление пород перед экскавацией, или доставка взрывом. В любом случае значение удельного расхода ВВ наиболее точно определяют экспериментально, т.е. по данным действующего промышленного предприятия, по которому выполняется проектирование БВР.

При отсутствии этих данных, или при освоении нового вида ВВ, удельный расход можно определить по формуле, предложенной автором совместно с П.Я. Кириком [10], кг/м³

$$q = (10,4 + 0,05f) \sqrt[4]{\Delta f^3 / Q^3}, \quad (1)$$

где $(10,4 + 0,05f)$, кДж^{0,75}/м^{2,25} - эмпирический и размерностный коэффициент; f - коэффициент крепости горных пород по шкале проф. М. М. Протодяконова; Δ - плотность ВВ, для широко применяемых эмульсионных ВВ находится в пределах 1100-1300 кг/м³, а для Анемикс-70-1220 кг/м³; Q - теплота взрыва (энергия), для того же ВВ - 3217 кДж/кг.

Расчетные значения удельного расхода ВВ для широкого диапазона крепости горных пород приведены в табл. 1

Таблица 1

| f | 5 | 8 | 11 | 14 | 17 | 20 | 23 | 26 | 29 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| q | 0,505 | 0,728 | 0,937 | 1,138 | 1,334 | 1,527 | 1,719 | 1,909 | 2,098 |
| q_1 | 0,506 | 0,727 | 0,938 | 1,138 | 1,336 | 1,527 | 1,719 | 1,910 | 2,143 |

При применении приведенных значений удельного расхода ВВ и минимальных отклонениях параметров расположения зарядов в массиве горных пород от проектных значений прогнозируемое значение линейного размера среднего куска в развале горных пород d_{cp} , может быть вычислено по эмпирической формуле разработанной со Е.Н. Швецом (2) [11], м

$$d_{cp} = ((0,6 + 0,9f) \cdot D^{0,61} \cdot \Delta^{0,25} \cdot f^{0,19}) / (q \cdot Q^{0,75}), \quad (2)$$

где D - размер среднего структурного блока в массиве горных пород, м. Расчетные значения линейного размера среднего куска приведены в табл. 2.

Таблица 2

| f | 5 | 8 | 11 | 14 | 17 | 20 | 23 | 26 | 29 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| q_{cp} | 0,053 | 0,084 | 0,143 | 0,199 | 0,252 | 0,305 | 0,356 | 0,406 | 0,446 |

Формула (2) содержит трудно измеряемый с высокой точностью натурными измерениями параметр D . Для уточнения его значения на различных участках карьера предлагается проводить экспериментальные взрывы, а при экскавации горных пород полученных развалов тщательно устанавливать количество негабаритных кусков на 1000 м³ отгруженных пород. Результат, при этом, получается дробным, например, $N=5,38$, или 4,13 и др., таким его и следует использовать при вычислении выхода негабарита $Y_{\geq 1,2}$ по уравнению регрессии - формула 3

$$Y_{\geq 1,2} = 0,0026 \cdot N^3 + 0,018 \cdot N^2 + 0,02 \cdot N + 0,02, \% \quad (3)$$

Результаты расчетов по формуле 3 сведены в табл. 3.

Таблица 3

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| $Y_{\geq 1,2}$ | 0,061 | 0,153 | 0,312 | 0,554 | 0,895 | 1,35 | 1,934 | 2,663 | 3,553 | 4,62 |

Нелинейный рост выхода негабарита объясняется наблюдаемым на практике увеличением размеров кусков при возрастании их количества в забое. Естественно, вычисления выхода не-

габарита могут быть выполнены при любом дробном значении N . Имея точное значение выхода негабарита, мы можем вычислить фактическое значение размера среднего куска в развале горных пород, используя уравнение Розина-Раммлера, %

$$\gamma_{\geq 1,2} = 100 \cdot e^{-\left(\frac{1,2}{d_{cp}}\right)^n}, \quad (4)$$

где e - основание натуральных логарифмов; n - показатель равномерности дробления пород, изменяющийся в пределах 1,0-1,7. Для вычисления этого показателя можно воспользоваться формулой Каннингема К.В.Б. [12]. Предлагается следующая эмпирическая формула

$$n = ((q \cdot \Delta^{0,125} \cdot Q^{0,215}) / (f \cdot D^{0,05})) - 0,01. \quad (5)$$

Расчетные значения показателя n содержатся в табл. 4

Таблица 4

| f | 5 | 8 | 11 | 14 | 17 | 20 | 23 | 26 | 29 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| n | 1,535 | 1,363 | 1,262 | 1,189 | 1,137 | 1,092 | 1,063 | 1,038 | 1,018 |

В уравнении (4), при известном, точно установленном выходе негабарита и вычисленном показателе n , неизвестным оказывается фактический линейный размер среднего куска во взрывном развале, который мы и вычисляем. После этого, используя формулу (2), вычисляем фактические значения размеров структурных блоков в массивах горных пород на конкретных участках карьера D , которые другими способами определить с высокой точностью трудно, и применяем их при последующем выполнении здесь взрывных работ для выполнения вычислений по формулам, содержащим D .

Уравнение (2), кроме других величин содержит значение удельного расхода ВВ, которое, будучи решенным относительно этого показателя, примет вид, кг/м³

$$q_1 = ((0,6 + 0,9f) \cdot D^{0,61} \cdot \Delta^{0,25} \cdot f^{0,19}) / (d_{cp} \cdot Q^{0,75}). \quad (6)$$

В табл. 1 приведены значения удельного расхода ВВ, полученные по этой формуле. Они хорошо согласуются с вычисленными по формуле 1. Это не случайно, и только свидетельствует в пользу того и другого подхода к определению удельного расхода ВВ. Иерархически таким же важным показателем, как удельный расход ВВ, является параметр сетки скважин, назовем его W_2 , в отличие от W_1 - линии сопротивления по подошве перед первым рядом скважин. W_2 может быть определен по следующей формуле, м

$$W_2 = (1,42 - 0,11 \times \ln f) \times d_{zap} \times \sqrt[4]{\frac{\Delta \times Q}{f}}. \quad (7)$$

Расчетные значения параметра сетки скважин W_2 приведены в табл. 5

Таблица 5

| f | 5 | 8 | 11 | 14 | 17 | 20 | 23 | 26 | 29 |
|----------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| W_2 | 9,25 | 7,9 | 7,06 | 6,5 | 6,07 | 5,74 | 5,46 | 5,23 | 5,0 |
| W_{2a} | 9,15 | 7,8 | 7,0 | 6,44 | 6,0 | 5,68 | 5,41 | 5,18 | 4,93 |

В табл. 5 под символом W_{2a} содержатся значения параметра сетки скважин, рассчитанные с учетом факторных признаков: d_{cp} ; D ; а также высоты уступа H_y и длины заряда L_{zap} по формуле, приведенной ниже, м

$$W_{2a} = d_{zap} \cdot \sqrt{\frac{0,785 \cdot \Delta^{0,75} \cdot Q^{0,75} \cdot d_{cp} \cdot L_{zap}}{(0,9 \cdot f^{1,19} + 0,6 \cdot f^{0,19}) \cdot D^{0,61} \cdot H_y}}. \quad (8)$$

Введение в формулу (7) значений размера структурного блока в массиве - D , а также размера среднего куска во взрывном развале d_{cp} , позволяет обеспечивать прогноз кусковатости в проектируемом к взрыву блоке с учетом структурных особенностей взрывааемых горных пород. Относительные отклонения рассчитанных параметров сетки скважин по варианту W_{2a} в сравнении с предыдущим вариантом не превышают 2%. В формуле (8) присутствует параметр - длина заряда L_{zap} , которую вычисляли по формуле, м

$$L_{zap} = W_2^2 \cdot H_y \cdot q / p, \quad (8)$$

где $p = \pi d_{zap}^2 \cdot \Delta / 4$.

Если в карьере применяется шахматная сетка скважин, то уравнения 6 и 7 могут быть использованы для определения расстояний между рядами скважин. Тогда расстояния между скважинами в ряду a определяются: $a=1,15 \cdot W_2=1,15 \cdot W_{2a}$.

В табл. 6 приводится пример измерения негабаритов в карьере ЮГОК.

Таблица 6

Измерение негабаритов в карьере ЮГОК

| Горизонт, м | Экскаватор, номер | Количество бутов, шт. | Объем отгрузки, м ³ | Количество бутов на 1000 м ³ , шт. | Выход негабарита, % |
|-------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|---|---------------------|
| -180 | 16 | 405 | 76731 | 5,82 | 1,01 |
| -195 | 6 | 190 | 21538 | 8,82 | 3,38 |
| -180 | 12 | 221 | 25846 | 8,55 | 3,13 |
| -225 | 10 | 312 | 46154 | 6,76 | 1,78 |
| -180 | 16 | 164 | 26727 | 6,14 | 1,42 |
| -195 | 5 | 589 | 72850 | 8,09 | 2,74 |
| -195 | 6 | 610 | 78750 | 7,75 | 2,47 |
| -150 | 15 | 125 | 15625 | 7,99 | 2,66 |

Приведенный учет негабарита выполнялся работниками геологической службы карьера по составленной нами методике. При этом по завершению учета у конкретного экскаватора, диспетчеру сообщали номер экскаватора, количество бутов и текущее время, формирующее объем отгрузки, а на последнем буге ставилась метка краской из баллончика, как ориентир для учета в последующее посещение. Такие замеры выполняются два раза в неделю (преимущественно).

Приведенный учет нужно четко соотносить с типами горных пород в отгружаемом блоке.

По мере накопления информации может быть составлена более полная таблица, как сведения о результатах взрывного дробления для всех работающих и как инструмент для пользования, например, начальниками участков, руководством карьера, для расчетов по оплате труда подрядчиков, для уточнения паспортов БВР.

Выводы. Приведены полученные новые формулы, представляющие взаимоувязанный расчетный пакет: для прогноза линейного размера среднего куска d_{cp} во взрывном развале, выхода негабарита $\geq 1,2$ м в нем по учету количества негабаритов на 1000 м^3 отгрузки, показателя равномерности дробления n в уравнении Розина-Раммлера, удельного расхода ВВ q и взаимосвязанного с ним параметра квадратной сетки скважин W_2 , обеспечивающих получение заданного линейного размера среднего куска d_{cp} , с учетом среднего размера структурного блока в массиве D .

Список литературы

1. Dahlhielm, S., Franklin, J.A., Katsabanis, P.D. Промышленное применение анализа изображений. Система IPACS для измерения фрагментации взрыва. Balkema, Rotterdam, 1996, pp 59-65.
2. Maerz, N.H., Palangio, T.C. and Franklin, J.A. WipFrag image based granulometry sistem. Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of blast fragmentation. - Montreal, Quebec. - Canada. - 23-24 Aug., 1996.
3. Eden, D.J., and Franklin, J.A. Fusion and disintegration problems, 1996.
4. Cochran, William G., Sampling Techniques. New York: John Wiley & Sons, inc, 1977.
5. Kemeny, J. M. Practical technique for determining the size distribution of blasted benches, waste dump and heap leach sites. Min. Engg., 1994. - PP. 1281-1284.
6. Spathis, A.T., 2004. Personal communication on paper to be published in Fragblast journal, 2005.
7. Ещенко А.А., Шапури́н А.В., Полищук Г.К., Грибенко Н.Г. К оценке кусковатости горных пород фотометрическими методами. Горный журнал. Изв. вузов. - 1972. - №11.
8. Шапури́н А. В., Васильчук Я. В. Качество дробления горных пород как результат комплексного влияния различных факторов // Весник КНУ. - 2013. Кривой Рог. - вып. 32.
9. В. М. Кузнецов Математические модели взрывного дела. - Новосибирск, 1977.
10. Шапури́н О.В., Кирик П.Я. Руйнування гірничих порід вибухом: Навч. Посібник. К. ІСДО, 1995. 280 с.
11. Швець С. М. Оптимізація вибухового подрібнення скельних порід на залізрудних кар'єрах / Автореф. дис. канд. техн. наук, 2013.
12. Каннингем К. В. Б. Модель Куз-Рам – 20 лет спустя. Европейская федерация инженеров взрывников : материалы брайтонской конференции. – Брайтон, 2005.- С. 201 – 210.

Рукопись поступила в редакцию 14.03.14