

И.КРСМАНОВИЧ
Корпорация «TRAYAL», Сербия

ТЕХНОЛОГИЯ ВЗРЫВАНИЯ НА КАРЬЕРЕ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ МАЙДАНПЕК

Физико-механические характеристики горных пород. Горный институт в Белграде выполнил исследования физико-механических свойств горных пород на небольших образцах. Полученные средние значения приведены в табл.1 и 2.

Классификация горных пород по трещиноватости и степени блочности. Исследования геологических и структурных особенностей строения массива показали, что в андезитах с глубиной наблюдаются сбросы диагонального типа, разрывающие рудную зону на блоки. Ширина сбросов до 1 м, а в некоторых случаях и больше. Наличие сбросов существенным образом влияет на процесс бурения и качество взрывоподготовки горной массы. Диагональные сбросы имеют крутое падение, а кливажи и трещины – пологое. Пологое падение трещин оказывает сильное влияние на условия распространения взрывных волн, что необходимо учитывать при проектировании взрывных работ. Наличие глины в сбросах затрудняет процесс бурения, что также необходимо учитывать при размещении серии скважин.

Степень трещиноватости горных пород месторождения представлена в табл.3. На рис.1 показано распределение гранулометрического состава горных пород в массиве, полученное по данным фотопланиметрической съемки поверхности уступа. Процентное содержание блоков по составу горных пород представлено в табл.4.

Таблица 1

Горная порода	Удельный вес, Н/м ³	Объемный вес, Н/м ³	Пористость P, %	Предел прочности при сжатии, кПа	Прочность на растяжение, кПа	Прочность на изгиб, кПа
Андезит	26,77	25,78	3,63	10,48 × 10 ⁴	1,25 × 10 ⁴	1,87 × 10 ⁴
Известняк	26,45	25,92	2,04	10,60 × 10 ⁴	0,80 × 10 ⁴	1,78 × 10 ⁴
Гнейс	27,16	26,20	3,53	6,25 × 10 ⁴	0,86 × 10 ⁴	1,26 × 10 ⁴
Зеленый сланец	28,06	27,75	1,05	9,27 × 10 ⁴	1,14 × 10 ⁴	1,53 × 10 ⁴

Окончение табл. 1

Горная порода	Сопротивление срезу, кПа	Твердость по Шору	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения	Вязкость по МАКу $\dot{\gamma}$, кПа	Статистический модуль упругости, кПа
Андезит	1,29 × 10 ⁴	44,88	1,99 × 10 ⁴	50°	31,18	52,42 × 10 ⁶
Известняк	1,04 × 10 ⁴	41,5	1,65 × 10 ⁴	57 40'	21,74	73,54 × 10 ⁶
Гнейсы	0,76 × 10 ⁴	42,8	1,36 × 10 ⁴	49 26	27,25	39,02 × 10 ⁶
Зеленый сланец	1,11 × 10 ⁴	48,9	1,86 × 10 ⁴	51 26	30,98	76,97 × 10 ⁶

Таблица 2

Тип породы	Скорость продольной волны на образце V_u^u , м/с	Скорость продольной волны в массиве V_u^m , м/с	V_u^m / V_u^u	Динамический модуль упругости E_{dm} , кПа	Коэффициент Пуассона
Андезит	5,050	3,100	0,61	15,60 × 10 ⁶	0,25
Известняк (запад)	5,000	2,150	0,43	5,68 × 10 ⁶	0,40
Известняк (восток)	5,000	2,350	0,47	6,86 × 10 ⁶	0,40
Гнейсы	4,580	2,150	0,47	9,80 × 10 ⁶	0,28
Зеленые сланцы	6,100	2,050	0,34	13,60 × 10 ⁶	0,28

Таблица 3

Вид горной породы	Степень трещиноватости	Среднее расстояние между трещинами, м
Зеленые сланцы	Умеренно трещиноватые	0,5-1,0
Гнейсы	— " —	0,5-1,0
Андезиты	— " —	0,5-1,0
Известняки	Слабо трещиноватые	1,0-1,5

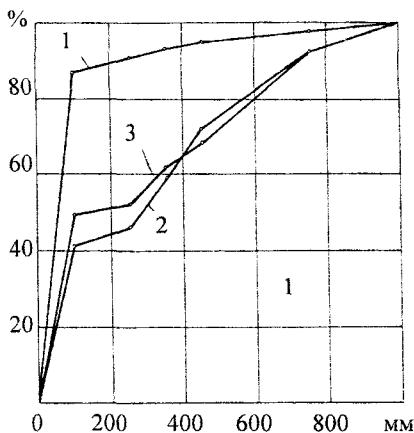


Рис. 1. Гранулометрический состав горных пород в массиве
1 — известняк; 2 — андезит; 3 — гнейс

У известняков, которые очень неоднородны по структуре, при бурении уступного блока нужно оценивать структурные элементы массива в рамках серии скважин.

На основе описанной микротектоники все существующие группы пород можно распределить, как показано в табл. 3.

Фотопланиметрической съемкой установлены размеры блоков на поверхности массива (табл. 4), гранулометрический состав горных пород в массиве показан на рис. 1.

Из данных табл. 4 можно сделать вывод, что у известняков блоков размером свыше 500 мм только 5 %, поэтому известняки относятся к классу мелкоблочной горной породы, в то время как в андезите блоков крупнее 500 мм — 28,9 %, а в гнейсе — 31,8 %, и эти горные породы относятся к среднеблочным.

Таблица 4

Размер блока, мм	Содержание блоков, %		
	Андезит	Гнейс	Известняк
< 200	40,1	49,3	87,2
200- 300	5,0	2,5	3,3
300- 400	13,3	9,4	2,1
400- 500	12,7	7,0	2,4
500- 1000	20,9	24,1	3,0
> 1000	8,0	—	2,0
Σ	100,0	100,0	100,0

Типы ВВ для взрывания горных пород. С момента пуска в производство рудника в 1961 г. и до 1967 г. для взрывания руды и пустой породы при открытой разработке были использованы нитроглицериновые ВВ витезиты, порошкообразные аммоналы, затем патронные водостойкие обиличи и бориты.

Для инициирования первых двух типов ВВ использован детонирующий шнур Ц-10 и Ц-12, а водостойкие ВВ инициировали патронами витезита в скважинах с водой или патронами аммонала. Каждая из скважин была оснащена одним проводом детонирующего шнура до дна скважины, причем для активирования серии использовали электродетонаторы с интервалом замедления 34 мс.

Применение взрывчатой смеси АСДТ и механизированного заряжения скважин началось 04.07.1975 г. на открытой разработке горного предприятия меди Бор. Взрывчатые смеси SLURRY и механизированное заряжение по системе NALIM на самой выемке начали использовать на открытой разработке горного предприятия меди Майданпек с 1976 г. С этого времени и до наших дней для массовых взрывов используются взрывчатые смеси АСДТ-П, майданиты, а в последнее время эмульсионные ВВ детолиты, характеристики которых показаны в табл.5-7.

Таблица 5

Взрывотехнические характеристики	АСДТ-П
Рекомендуемый промежуточный детонатор для $d > 150$ мм	360 г пентолита
Плотность, л/кг	0,85-1,00
Теплота взрыва, кДж/кг	3870
Газовый объем, л/кг	900
Скорость детонации, патронный заряд, м/с	3000-4500
Баланс кислорода	Слегка отрицательный
Водостойкость	Слабая
Диаметр применения, мм	100

Таблица 6

Характеристики	Детолит-ПЕ	Детолит-ПЕМ
Плотность, кг/л		1,1-1,3
Теплота взрыва, кДж/кг	3015	3560
Газовый объем, л/кг	947	898
Скорость детонации, м/с	4800-5000	4600-4800
Минимальный диаметр употребления, мм		90
Инициирование		300 г пентолита
Баланс кислорода, %		0
Стабильность под водой, дни		20
Водостойкость		Отличная

Таблица 7

Характеристики	М-10	М-12	М-13	М-18	М-20
Плотность, кг/л	1,06-1,25				
Скорость детонации, м/с	3600-4000				
Теплота взрыва, кДж/кг	3140	3140	3475	3809	4211
Газовый объем, л/кг	1072	1041	1010	980	886
Рекомендуемый диаметр применения, мм	> 120				
Водостойкость	Отличная				
Рекомендуемый промежуточный детонатор	360 г пентолита				
Стабильность в скважине под водой, дни	> 20				

Наряду с развитием малочувствительных ВВ типа АСДТ-П и SLURRY, освоены адекватные средства для их инициирования – пентолитовые промежуточные детонаторы. Это составы на основе литой смеси ТНТ и пентрита в отношении 50/50, основные характеристики показаны в табл.8.

Таблица 8

Характеристики	ПП-360	ПП-300	ПП-80
Размеры, мм	70 × 59	50 × 95	41 × 45
Масса, г	360	300	80
Скорость детонации, м/с	7000		
Детонационное давление, кбар	204		

Параметры буровзрывных работ со SLURRY, ВВ и майданитами на открытой разработке горного предприятия меди Майденпек показаны в табл.9.

Таблица 9

Параметры	Тип горной породы	
	Андезит	Известняк
Высота уступа, м	12-18 / 12-18	12-18 / 12-18
Угол наклона уступа, град.	65 / 65	70/70
Перебур скважины, м	1 / 1	1 / 1
Глубина скважины, м	13-19 / 13-19	13-19 / 13-19
Расстояние скважины от верхней бровки уступа, м	6 / 9	5 / 8
Расстояние между скважинами в ряду, м	7 / 11	6 / 10
Расстояние между рядами скважин, м	6 / 9	5 / 8
Вместимость 1 м скважины, кг:		
АСДТ	35 / 64	35 / 64
SLURRY М-10	47 / 87,5	47 / 87,5
Забойка скважины, м	5,4 / 8,6	5,4 / 8,6
Среднее количество ВВ по скважине, кг	500 / 650	500 / 650
Выход материала, т/м	200 / 260	176 / 251
Удельный расход ВВ, г/т	156 / 156	177 / 162
Интервал замедления, мс	50 / 50	13 / 20

Примечание. В числителе для диаметра скважин 229 мм, в знаменателе – 311 мм.

На открытой разработке горного предприятия меди Майданпек используется шахматное расположение скважин в три ряда из-за небольшой ширины уступа. На практике чаще всего применяют диагональные схемы, у которых достигается большее значение коэффициента сближения скважин и уменьшается так называемое интервальное сопротивление, т.е. линия

наименьшего сопротивления. При этой схеме инициирования достигается наилучшая степень дробления взорванной породной массы.

Применением короткозамедленного взрывания с интервалом замедления 40 мс между скважинами в ряду и 50 мс между рядами уменьшается сейсмический эффект взрыва, потому что каждый заряд имеет свой интервал замедления.

Большая степень дробления взорванной породной массы влияет на остальные технологические процессы. Число остановок дробильной установки, вследствие попадания негабаритных кусков, уменьшилось на 73 %, а расходы электроэнергии на 1,21 %, качество дробления улучшилось на 4,4 %, а обмен рабочих элементов на экскаваторах уменьшился на 24 %. Эти данные получены сравнением с данными периода применения классических патронированных порошкообразных аммоналов и водонаполненных ВВ типа борита. Вторичному дроблению должны быть подвергнуты 0,5 % кусков породной массы, что указывает на хорошее качество результатов взрывания.

Параметры взрывания на открытой разработке горного предприятия меди Майданпек с эмульсионным ВВ детолит-Пе показаны в табл. 10.

Таблица 10

Параметры	Диаметр взрывной скважины, мм	
	229	311
Высота уступа, м	15,0 / 15,0	15,0 / 15,0
Сопротивление в подошве уступа, м	8,0 / 7,0	11,0 / 9,0
Перебур скважины, м	2,0 / 2,0	2,5 / 2,5
Глубина взрывной скважины, м	17,0 / 17,0	17,5 / 17,5
Забойка скважины, м	10,0 / 9,0	10,0 / 10,0
Расстояние между скважинами в ряду, м	8,0 / 7,0	11,0 / 9,0
Расстояние между рядами скважин, м	7,0 / 6,0	9,0 / 8,0
Длина колонки заряда, м	7,0 / 8,0	6,5 / 7,5
Количество заряда по скважине, кг	382 / 433	650 / 700
Удельный расход ВВ, кг/м ³ (г/т)	0,413 (157) / 0,590 (223)	0,433 (164) / 0,576 (219)
Интервал замедления, мс	40 / 20	50 / 40

Примечание. В числителе для андезита, в знаменателе – для известняка.

Осуществленные параметры взрывания на открытой разработке горного предприятия меди Майданпек с эмульсионным ВВ детолит-ПЕМ показаны в табл. 11.

Таблица 11

Параметры	Диаметр взрывной скважины, мм	
	229	311
Высота уступа, м	15,0 / 15,0	15,0 / 15,0
Сопротивление в подошве уступа, м	9,0 / 8,0	11,5 / 10,0
Перебур скважины, м	2,0 / 2,0	2,5 / 2,5
Глубина взрывной скважины, м	17,0 / 17,0	17,5 / 17,5
Расстояние между скважинами в ряду, м	8,0 / 7,5	9,5 / 9,0
Расстояние между рядами скважин, м	7,5 / 7,0	9,0 / 8,5
Длина колонки заряда, м	8,5 / 9,5	6,5 / 8,0
Забойка скважины, м	8,5 / 7,5	11,0 / 9,5
Заряд по скважине, кг	433 / 485	617 / 759
Удельный расход ВВ, кг/т	0,163 / 0,206	0,158 / 0,208
Интервал замедления, мс	40 / 35	50 / 40

Примечание. В числителе для андезита, в знаменателе – для известняка.

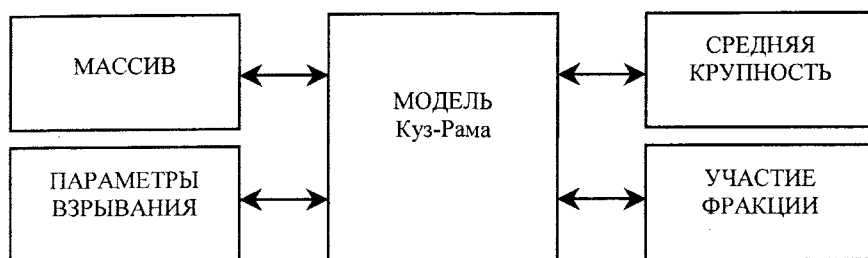


Рис.2. Блок-схема употребления модели Куз-Рама

Оценка granulometric composition of fragmented rock mass. При всех технологиях эксплуатации полезных ископаемых, где рудную массу добывают методом бурения и взрывания, устанавливают: требуемую крупность взорванной рудной массы, минимальный объем бурения и минимальный расход ВВ.

МОДЕЛЬ Куз-Рама устанавливает зависимость между параметрами взрывания, дробления и средней крупностью кусков взорванной руды, принимая во внимание естественную трещиноватость природного массива (рис.2).

В основе этой модели лежат результаты исследований, представленных в виде уравнений, Кузнецовым и Розиным – Рамлером. Cunningham в 1987 г. усовершенствовал модель и установил функциональную зависимость между коэффициентом приравнивания n и такими параметрами взрывания, как:

- расположение взрывных скважин;
- диаметр и длина взрывных скважин;
- линия наименьшего сопротивления;
- расстояние между скважинами в ряду;
- длина взрывного заряда;
- высота уступа;
- девиация скважин и т.д.

В основе модели лежит экспериментальная формула Кузнецова (Россия), с помощью которой определяется средний размер кусков:

$$d_{50} = K \left(\frac{V_b}{Q_b} \right)^{4/5} Q_b^{1/6}, \quad (1)$$

где d_{50} – средний размер куска (медиана granulometric composition), т.е. диаметр отверстия сита, через которое проходит 50 % взорванной массы, см; K – коэффициент сопротивления горной породы при взрывании, по Кузнецову, при крепости горных пород $f = 8 \div 16$ коэффициент $K = 7 \div 13$, обычно $K = 8 \div 12$; V_b – объем породной массы по скважине; Q_b – количество ТНТ ВВ, по энергии эквивалентного взрывному заряду в скважине.

Модификация формулы Кузнецова для расчета каких-угодно ВВ следующая:

$$d_{50} = K \left(\frac{V_b}{Q_b} \right)^{4/5} Q_b^{1/6} \left(\frac{115}{RTS} \right)^{19/30}, \quad (2)$$

где Q_b – количество ВВ в скважине, кг; RTS – работоспособность ВВ относительно АСДТ (для АСДТ $RTS = 100$).

Коэффициент сопротивления горной породы на взрывание колеблется в довольно широких пределах. На основе экспериментов коэффициент сопротивления горной породы на взрывание можно определить более точно (табл.12):

$$K = 0,06(RMD + JF + RDI + HF). \quad (3)$$

Параметры	Значение
<i>RMD</i> – характеристика трещиноватости горных пород	
Сильно раздробленный массив (трещины во всех направлениях)	$RMD = 10$
Вертикальная трещиноватость	$RMD = JF$
Массивная породная	$RMD = 50$
$JF + JPS + JPA$ – интенсивность трещиноватости крутых трещин, м:	
меньше 0,1	$JPS = 10$
0,1-1,0	$JPS = 20$
1,0- W	$JPS = 50$
JPA – наклон трещины:	
Падение, противоположное фронту уступа	$JPA = 20$
Направление, противоположное фронту уступа	$JPA = 30$
Падение к фронту уступа	$JPA = 40$
RDI – влияние плотности горной породы (ρ – плотность горной породы, т/м ³)	$RDI = 25\rho - 50$
HF – характеристика твердости горной породы	
Для $Y < 50$ ГПа (Y – модуль упругости Юнга, ГПа)	$HF = Y/3$
Для $Y > 50$ ГПа (σ_p – прочность на сечении, МПа)	$HF = \sigma_p/5$

Для известного значения d_{50} отсев и просев вычисляют по уравнению Розина – Рамлера

$$O = 100 \exp \left[-0,693 \left(\frac{X}{d_{50}} \right)^n \right]; \quad P = 100 - d(\%). \quad (4)$$

где O – отсев, процент материала, оставшегося на решетке с отверстием размером X ; P – просев, процент материала, проходящего через решетку с отверстиями размером X ; X – размер отверстий решетки, см; n – индекс приравнивания грануляции, определяемый на основе взрывания уступов по выражению

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{W}{D_e} \right) \left(1 - \frac{S_b}{W} \right) \left(\frac{a/W + 1}{2} \right)^{0,5} \left(\frac{|L_p - L_s|}{L_e + 0,1} \right)^{0,1} \frac{L_e}{H_f}; \quad (5)$$

W – сопротивление, м; D_e – диаметр взрывного заряда, мм; S_b – стандартная девиация ошибки бурения (м) на разработках, приблизительно ее можно найти из выражения

$$S_b \approx \frac{D_b}{2} + (0,0 - 0,03)H; \quad (6)$$

L_p – длина заряда в подошве уступа, м; L_s – длина колонки заряда, м; L_e – длина взрывного заряда над подошвой уступа, м; H – высота уступа, м; a/W – отношение расстояния между скважинами к линии наименьшего сопротивления.

Выражение (5) для n действительно для прямоугольного расположения скважин. Cunnigham рекомендует увеличить n на 10 %, если скважины в серии расположены в шахматном порядке.

Индекс грануляции, полученный по формуле (5), изменяется от $n < 1$ до $n \leq 2$, и чем индекс больше, тем размер кусков в массе меньше.

Модель, с одной стороны, устанавливает зависимость между параметрами взрывания и средней крупностью фракций взорванной рудной массы, с другой, учитывает природную трещиноватость породной массы. Для данных параметров взрывания можно определить среднюю крупность взорванной рудной массы, используя уравнение Кузнецова, вычислить необходимое

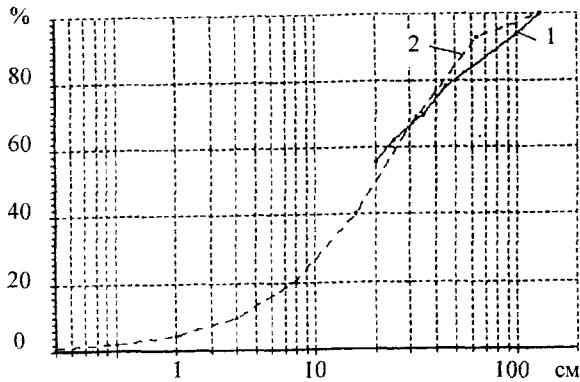


Рис.3. Кривые гранулометрического состава при взрывании на Е-335
1 — эксперимент; 2 — расчет

количество ВВ и на основе этого параметра взрывания известными методами определить остальные.

Если распределение взорванной рудной массы по крупности не удовлетворяет поставленным требованиям, можно его откорректировать. Этого достигают изменением параметров взрывания, т.е. изменением значения коэффициента приравнивания:

- уменьшением отношения W/D_e ;
- увеличением отношения a/W ;
- увеличением точности бурения;
- увеличением отношения L_e/H .

Пример расчета степени дробления.

Расчет степени дробления по методу Куз-

Рама сделан для андезита, гнейса и известняка. Приведем здесь расчет степени дробления для андезита:

• Число рядов	2
• Общее число скважин	13
• Сопротивление на подошве уступа	7,0
• Расстояние между скважинами	9,0
• Забойка взрывной скважины	6,9
• Глубина скважины	17,0
• Высота уступа	15,0
• Диаметр взрывной скважины	311,0
• Тип горной породы	Andezit
• Прочность горной породы (слабая = 1; сильная = 10)	
• Тип ВВ	ANFO
• Плотность породы	2,63
• Мощность (АСДТ = 10)	
• Диаметр взрывного заряда	311,0
• Общее количество ВВ в скважине	650,0
• Длина колонки заряда	10,0

Результаты расчета показаны в табл.13 и на рис. 3. Индекс степени дробления 1,1179.

Таблица 13

Размер отверстия решетки, см	Вход	Просев			Фракция		
		м ³	т	%	м ³	т	%
0,5	1	106	280	0,87	—	—	—
1,0	1	239	629	1,95	239	629	1,95
2,0	1	535	1,407	4,35	296	778	2,41
4,0	1	1,178	3,098	9,59	643	1,691	5,23
8,0	1	2,506	6,592	20,40	1,328	3,494	10,81
16,0	1	4,956	13,034	40,34	2,450	6,442	19,94
32,0	1	8,469	22,274	68,94	3,513	9,240	28,60
64,0	1	11,414	30,020	92,91	2,945	7,745	23,97
128,0	1	12,254	32,229	99,75	840	2,209	6,84

ВЫВОДЫ

1. Взрывные работы выполняются в очень сложных горно-технологических условиях, ибо ширина уступов недостаточна для широкого применения многорядного взрывания, а на месторождении есть старые выработки, пещеры, сбросы и другие аномалии, которые отрицательно влияют на результаты взрывания.

2. Близость города к открытой разработке требует определения оптимального интервала замедления средств инициирования для каждой рабочей среды и перехода к неэлектрической системе инициирования.

3. Применением современных ВВ (АСДТ, SLURRY и эмульсионных) достигнуты хорошие результаты дробления рудной массы, что отразилось на общих результатах добычи рудной массы.