

## ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАССИВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ

Очиллов Ш.А.<sup>1</sup>  
 Махмудов Д.Р.<sup>2</sup>,  
 Норинов С.С.<sup>2</sup>,  
 Газибекова У.Р.<sup>2</sup>,  
 Раимкулова С.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Университет геологических наук,

<sup>2</sup> Ташкентский государственный технический университет имени Ислама  
 Каримова, Ташкент, Узбекистан

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17337310>

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние параметров буровзрывных работ (БВР), физико-механических свойств горных пород и характеристик взрывчатых веществ (ВВ) на эффективность дробления в условиях глубоких карьеров. Представлены эмпирические зависимости, описывающие изменение плотности, размеров естественной отдельности и модуля Юнга пород с увеличением глубины залегания. Предложена классификация массивов по степени трещиноватости, основанная на средних размерах блоков и распределении крупной отдельности, и сформулирована математическая модель, учитывающая влияние этих факторов на гранулометрический состав после взрыва. Полученные результаты позволяют прогнозировать эффективность взрывных работ и оптимизировать параметры БВР для снижения затрат энергии на разрушение массива.

**Ключевые слова:** буровзрывные работы, трещиноватость, блочность, дробление, экономико-математическое моделирование, горные породы, модуль Юнга, плотность.

Основой для решения задачи определения основных закономерностей влияния параметров буровзрывных работ (БВР), физико-механических свойств массива и характеристик взрывчатых веществ (ВВ) на эффективность дробления горных пород является информация о степени дробления, которая включает в себя как физико-механические, так и горно-технические свойства пород и руд, с учетом их блочности и трещиноватости. Экспериментальные зависимости, полученные в исследованиях [1, 2], показывают, что изменение размеров естественной отдельности в массиве горных пород с глубиной может быть описано следующим корреляционным уравнением с коэффициентом корреляции  $r_k = 0,98$

$$d_{cp} = 0,0036H + 0,306, \quad (1)$$

где  $H$  – глубина расположения исследуемого слоя, м.

Результаты исследований показывают, что влияние глубины на размеры естественной отдельности в массиве горных пород требует комплексного подхода для учета различных факторов, таких как напряжения в породах, трещиноватость, а также характеристики взрывчатых веществ. Изменения в этих параметрах могут существенно повлиять на эффективность дробления горных пород и, следовательно, на результаты

взрывных работ в карьерах. Моделирование и использование данных корреляционных уравнений позволяет более точно прогнозировать результат взрывных операций и оптимизировать параметры для достижения максимально эффективного дробления и минимизации энергии, затрачиваемой на разрушение пород.

Изменение плотности горных пород с глубиной поддается корреляционной зависимости, которая выражается следующим образом, с коэффициентом корреляции  $r_k = 0,88$

$$\rho = 2329 + 1,5H. \quad (2)$$

Данная зависимость играет важную роль в прогнозировании характеристик дробления пород, так как плотность напрямую влияет на эффективность применения взрывчатых веществ и распределение энергии взрыва в массиве.

Изменение модуля Юнга горных пород с глубиной можно описать корреляционным уравнением, коэффициент корреляции которого составляет  $\tau_k = 0,76$

$$E = 3,4 + 0,015H. \quad (3)$$

Эта зависимость важна для оценки упругих свойств пород, что влияет на характеристики взрыва и эффективность дробления, так как модуль Юнга определяет сопротивление материала к деформациям под воздействием взрывной нагрузки.

При расчёте параметров буровзрывных работ (БВР) блочность горного массива оценивается посредством среднего (или средневзвешенного) размера блоков. Это даёт возможность разработать методику и алгоритмическое решение для определения гранулометрического состава пород, подвергающихся взрыву. Метод опирается на экономико-математический подход к анализу блочной структуры массива и систематизации массивов взрывааемых пород (МВК), а также на изучение закономерностей влияния различных факторов — параметров БВР, физико-механических свойств горных пород и характеристик применяемых взрывчатых веществ — на эффективность дробления в условиях глубоких карьеров [3-5]. В рамках классификации МВК ключевым фактором, по которому породы разделяются по степени трещиноватости, выступает не только среднее расстояние между трещинами различных систем, но и доля блоков крупного размера (более 300, 700 и 1000 мм) в общем объёме массива. Выделено пять технологических категорий пород, что позволяет учитывать их специфику разрушения при проведении взрывных работ (табл. 1).

Таблица 1

Классификация массивов крепких пород по степени трещиноватости и содержанию крупных отдельностей, разработанная МВК

Категория трещиноватости породы	Степень трещиноватости (блочности) массива	Среднее расстояние между трещинами всех систем	Удельная трещиноватость (число трещин на 1 м)	Содержание (%) в массиве отдельностей размером, мм					
				+ 300	+ 500	+ 700	+ 1000	+ 1500	+ 2000
I	Чрезвычайно трещиноватые (мелкоблочные)	До 0,1	Более 10	До 10	До 5	Близко к нулю	Нет	Нет	Нет

II	Сильнотрещиноватые (среднеблочные)	0,1-0,5	12-10	10-70	5-40	До 30	До 5	Близко к нулю	Нет
III	Среднетрещиноватые (крупноблочные)	0,5-1,0	1-2	70-100	40-100	30-80	5-40	До 10	Близко к нулю
IV	Малотрещиноватые (весьма крупноблочные)	1,0-1,5	0,65-1,0	100	100	100	40-100	10-50	До 10
V	Монолитные (исключительно крупноблочные)	Свыше 1,5	Менее 0,65	100	100	100	100	Более 50	Более 10

На основе принятой классификации были построены графики (рис. 1), отображающие разграничительные линии, по которым массивы горных пород в условиях глубоких карьеров разделяются на категории в зависимости от степени их трещиноватости. Процентное содержание блоков с размером, превышающим  $D_i$ , определяется с использованием уравнения следующей формы [5]:

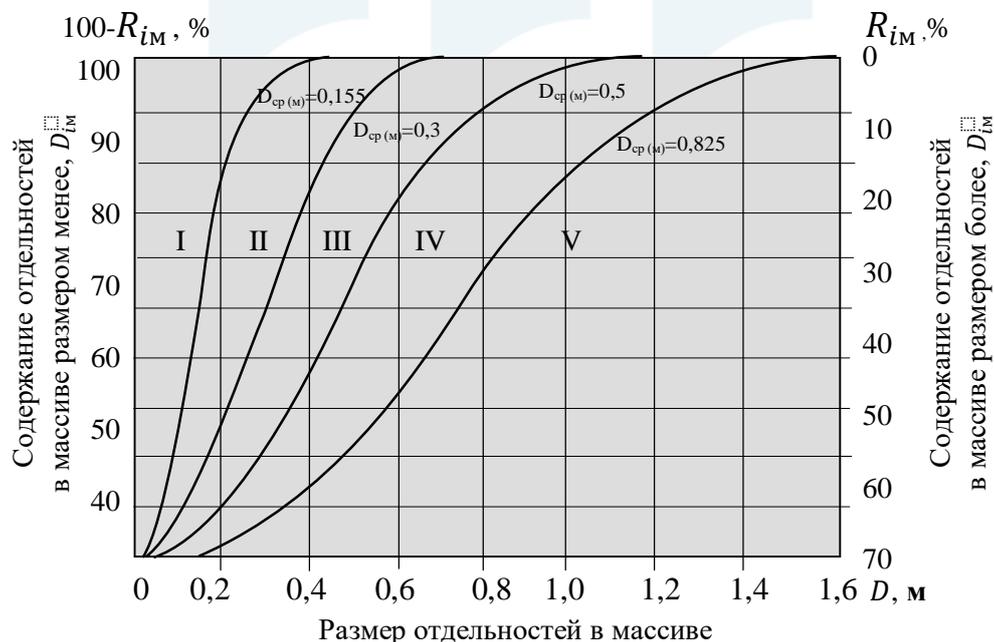
$$R_{iM} = \frac{100}{e^{3 \cdot k^2 \cdot D_i^\lambda}}, \% \quad (4)$$

где  $k$  – эмпирический показатель, характеризующий средний размер отдельности  $D_{cp(M)}$  в массиве;

$D_i$  – размер отдельности (блока) в массиве;

$\lambda$  – эмпирический коэффициент, характеризующий трещиноватость (блочность) массива

$$\lambda = 0,667 / (k + 2,05). \quad (5)$$



I – зона легковзрываемых (мелкоблочных) пород; II – зона средневзрываемых (среднеблочных) пород; III – зона трудновзрываемых (крупноблочных) пород; IV – зона очень трудновзрываемых (очень крупноблочных) пород; V – зона исключительно трудновзрываемых (исключительно крупноблочных) пород

**Рис. 1. Графическое представление классификации массивов горных пород глубоких карьеров по степени трещиноватости и блочности**

Существует связь между эмпирическим коэффициентом  $k$  и средним значением отдельности в массиве, которая выражается зависимостью

$$k = 0,5/D_{\text{cp}(M)}^{1,05+D_{\text{cp}(M)}}. \quad (6)$$

Используя зависимости (3.4)-(3.6), можно провести оценку распределения отдельностей для различных типов пород в широком диапазоне трещиноватости при заданном коэффициенте корреляции  $r_k = 0,71 \div 0,84$

$$\lambda = 1 + 0,667/(k + 0,05)$$

$$k = 0,35/D_{\text{cp}(M)}^{1,05+D_{\text{cp}(M)}}. \quad (7)$$

Сопоставление интегральных распределений блоков в массиве с классификацией горных пород по МВК, приведённые на рис. 1, показывает, что породы можно отнести к I, II и III категориям по МВК; из III категории выделена небольшая по объёму (до 4%) IV категория весьма крупноблочных пород.

Таким образом, разработанная экономико-математическая модель обеспечивает системный подход к анализу трещиноватости массива и эффективности дробления при взрывных работах. Учёт изменений свойств массива с глубиной позволяет более точно прогнозировать параметры дробления, оптимизировать использование ВВ и повысить эффективность буровзрывных операций. Методика может быть использована при проектировании взрывных работ на глубоких горизонтах карьеров, где критически важно учитывать геомеханические изменения массива.

### Adabiyotlar, References, Литературы:

1. Иванов А.А. и др. Геомеханические основы БВР. — М.: Горная книга, 2008. — С. 187.
2. Петров И.И., Сидоров С.П. Эмпирические зависимости дробления. — М.: Недра, 2009. — С. 32–33.
3. Справочник по буровзрывным работам / Под ред. Кузнецова В.В. — М.: Недра, 2011. — С. 94.
4. МВК. Методика оценки блочности массивов. — М.: Институт горного дела, 2012. — С. 342–343.
5. Орлов В.Г. Структурные модели массивов. — СПб.: ГИ, 2014. — С. 213–215.