

## СТАТИСТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БУРО-ВИБУХОВИХ РОБІТ НА КАР'ЄРАХ

Процес подрібнення скельових порід вибухом на кар'єрах представлено дискретним перехідним процесом, управління яким запропоновано виконувати на основі статичної моделі, що передбачає оперативне отримання об'єктивної інформації про міцність і тріщинуватість порід, її статистичний аналіз і практичне впровадження одержаних результатів в різноманітних гірничо-геологічних умовах.

Процесс дробления скальных пород взрывом на карьерах представлен дискретным переходным процессом, управление которым предложено выполнять на основе статической модели, предусматривающей оперативное получение объективной информации о крепости и трещиноватости пород, ее статистический анализ и практическое использование полученных результатов в разнообразных горно-геологических условиях.

The process of crushing of rocky breeds an explosion on careers is presented by a discrete transient, management which it is offered to execute on the basis of static model, foreseeing the operative receipt of objective information about a fortress and fissuring of breeds, her statistical analysis and practical use of the got results in the various mining and geological conditions.

Прибутки гірничих підприємств, які розробляють родовища скельових корисних копалин визначаються техніко-економічними показниками комплексу буро-вибухових робіт (далі скорочено БВР).

Способи оптимізувати ці роботи, як правило, зводяться до складання цільової функції, її дослідження по мінімуму сумарних витрат на основні технологічні процеси і визначення найбільш сприятливого питомого заряду вибухової речовини. Одержаний розрахунковий результат важливого параметра управління комплексом БВР неефективний в практичному застосуванні, бо він суттєво залежить від фізико-механічних властивостей гірничих порід, об'єктивна оцінка яких в кожному конкретному випадку не передбачувана. Вірогідність помилки при цьому обумовлена тим, що дробимість порід енергією вибуху відрізняється не тільки в межах відведеного родовища, а навіть на кожній його частині (тобто на кожному блоці порід, що розробляється).

Кінцевий результат подрібнення скельових порід вибухом (гранулометричний склад гірничої маси) взагалі не контролюється за винятком відносної оцінки некондиційних фракцій, тобто негабаритних кусків, які потребують додаткового подрібнення.

Відсутність оперативної інформації про стан гірничих порід до вибуху і після нього, безумовно, не дає можливості приймати найкращі стратегії управління при проектуванні і виконанні буро-вибухових робіт в різноманітних геологічних умовах.

Запропоновано роздрібнення скельових порід вибухом розглядати як перехідний процес від одного ступеня їх подрібнення тріщинами природного та технічного походження в другий, більш інтенсивний за рахунок прикладеної енергії підірваної вибухової речовини (рис. 1).

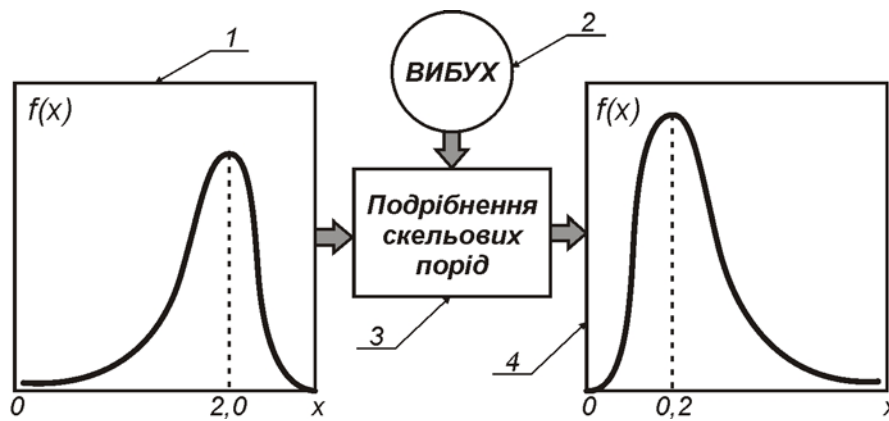


Рис. 1. Схематичне представлення перехідного процесу подрібнення скельових гірничих порід вибухом,

де 1; 4 – диференційні функції розподілу середніх розмірів кусків порід відповідно до і після вибуху,  $x$ , (м); 2 – вибух в умовному зображенні; 3 – «чорний ящик», в якому формується складне поле напруг і внаслідок його дії виконується подрібнення масиву порід

Вказане представлення процесу подрібнення порід, що розробляються, дозволяє впровадити для нього ефективний метод управління по зворотному зв'язку. Він передбачає одержання оперативної інформації про стан перехідного процесу на його початку і в кінці, порівняння одержаних результатів з еталоном, корегування параметрів управління по відхиленням і їх реалізацію на наступному етапі. Такі операції циклічно повторюються для кожного блока порід по мірі переміщення діючої лінії забоїв.

До початкової інформації про стан масиву гірничих порід віднесено їх міцність і тріщинуватість (тобто характеристику природної блочності). З метою оперативного її отримання створено і випробувано в промислових умовах експериментальний зразок електронного приладу. Він передбачає безперервну реєстрацію швидкості буріння гірничих порід при обов'язковому контролі основних експлуатаційних параметрів бурового верстата. Це – тиск в робочому гідроциліндрі і частота обертів виконавчого органа.

Для встановлення залежності швидкості буріння свердловини від міцності порід, що пересікаються нею, були виконані широкі статистичні дослідження. Вони базувались на багатьох експериментах, проведених в промислових і лабораторних умовах.

На різних ділянках родовища корисних копалин, що розробляються кар'єром, бурились свердловини шарошечним верстатом по сітці, розрахованій з точки зору випадкових подій. На кожному метрі глибини свердловини фіксувались середні значення швидкості буріння, осьового зусилля на долото і частоти обертів бурової штанги. Поруч з такою свердловиною бурилась свердловина колонковим верстатом і із одержаного керна порід виготовлялись зразки для лабораторних досліджень. При цьому глибини свердловин, з яких брались зразки порід і на яких досліджувались основні характеристики шарошечного буріння, ставились у відповідність. Всі зразки порід випробувались на одновіс-

не стиснення з послідуючим визначенням коефіцієнта міцності за Протодьяконовим.

Після статистичного опрацювання численних експериментальних даних одержана наступна залежність між величинами, що тісно корелюють [1]:

$$v = \eta \frac{\sqrt{pn}}{f^2 d},$$

Звідки

$$f = k \sqrt[4]{pnt^2},$$

де  $v$  – швидкість буріння свердловини,

$\eta$  – коефіцієнт, який залежить від типу корисної копалини;

$p$  – тиск в робочому гідроциліндрі бурового верстата;

$n$  – частота обертів виконавчого органа;

$f$  – коефіцієнт міцності за Протодьяконовим;

$d$  – діаметр бурового долота, який для кар'єрів практично не змінюється;

$k$  – коефіцієнт, враховуючий сталі технологічні показники,  $k = \sqrt{\frac{\eta}{ld}}$ ;

$l$  – довжина частини свердловини, яка контролюється;

$t$  – час буріння частини свердловини довжиною  $l$ .

Шляхом перетворення значень вимірювальних параметрів  $p, n, t$  в пропорційні електричні сигнали реалізовано алгоритм визначення коефіцієнта міцності порід безпосередньо на буровому верстаті за допомогою нової моделі електронного приладу.

Загальний вигляд приладу показано на рис. 2.



Рис. 2. Загальний вигляд електронного приладу для вимірювання міцності і тріщинуватості гірничих порід

Промислові випробування приладу показали, що в межах статистичної похибки він дозволяє оцінювати руйнівну здатність скельових порід, тобто оперативно одержувати інформацію про початковий стан перехідного процесу, запро-

понованого в даній науковій роботі. Слід відмітити, не варто чекати остаточної розробки метода управління комплексом БВР по зворотному зв'язку, створений прилад уже зараз корисний інженерно-технічним працівникам кар'єрів на стадії проектування масових вибухів. Для ефективного його використання рекомендовано міцність і тріщинуватість порід вимірювати під час буріння перебурів свердловин вищих горизонтів, або при бурінні декількох вибіркових свердловин. В останньому випадку вибірка повинна бути репрезентативною, тобто її об'єм обчислюється по загально відомим статистичними правилами.

Процес подрібнення скельових порід вибухом, умовно віднесений до «чорного ящика», представляє собою інтенсивне руйнування природних блоків під впливом складного поля напруг, сформованого енергією підірваної вибухової речовини. Звідси виходить, що розподіл окремих кусків за розмірами в об'ємі одержаної гірничої маси (її фракційний склад) залежить від первинних характеристик масиву гірничих порід, а також від тензорних полів, зумовлених наступним тензором напруг:

$$T_n = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} = \sigma_{ij} r_i$$

де  $\sigma_{ij}$  – множина напруг (дев'ять складових), нормальних ( $i = j$ ) відносно трьох взаємно перпендикулярних площадок;  $r_i$  – одиничний вектор, нормальний до відповідної площадки.

Залежність міри роздрібнення гірничої маси від параметрів поля напруг розглянуто в лінійному просторі, адже в прикладних дослідженнях домінує гіпотеза, що руйнування крихких матеріалів переважно відбувається за рахунок розтягуючих напруг. При цьому прийнята статистична теорія роздрібнення гірничих порід вибухом.

Кожній ослабленій точці породи (дислокації, мікро- чи макротріщині) відповідає напруга, при якій з цієї точки починає розвиватися тріщина. Очевидно існує функція, яка визначає залежність кількості тріщин, що розгалужуються в одиниці об'єму, від величини напруг, які спричинили їх розвиток

$$n = f(\sigma)$$

При цьому середня величина одержаного куска буде

$$\begin{cases} g_{cp} = \frac{1}{f(\sigma)}, \\ g_{cp} = \varphi(\sigma). \end{cases}$$

Приведена функція називається функцією роздрібненості, її графік показано на рис. 3.

Точка А перетину кривої з віссю V ( $\sigma = 0$ ), показує величину середнього об'єму тих частин, на які масив розбито природною тріщинуватістю.

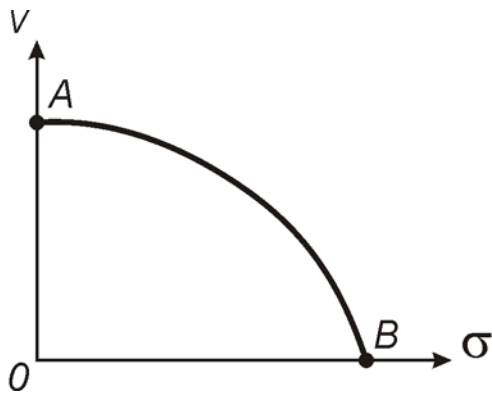


Рис. 3. Графік залежності середнього об'єму тих частин, на які розділяється порода від прикладених напруг

збільшуватися число ослаблених місць, з яких розвиваються тріщини. Так як зі зростанням  $\sigma$  зменшується середній об'єм, що приходить на одну ослаблену точку (функція  $\varphi(\sigma)$  обернена функції  $f(\sigma)$ ), то, відповідно, зменшується середня відстань між точками і, очевидно, час, необхідний для зімкнення тріщин.

Із цього слідує важливий для практики роздрібнення порід висновок: короткий імпульс високих напруг, діючих впродовж часу, достатнього для зімкнення тріщин, роздрібнює породу сильніше, ніж довгий імпульс низьких напруг.

Більш детальний розв'язок задач формування кусковатості гірничої маси, одержаної завдяки енергії вибуху, запропоновано розглядати на основі прогнозування закономірностей розміщення (розподілу) ослаблених точок в природному масиві. Цей розподіл має випадковий характер і потребує аналізу в кожних гірничо-геологічних умовах. Якщо положення якої-небудь точки не залежить від місць знаходження інших точок, то згідно з [2] вони розподіляються в об'ємі по закону Пуассона

$$p_m = \frac{(n\vartheta)^m}{m!} e^{-n\vartheta}$$

де  $p_m$  – вірогідність попадання точок в розглядаємий об'єм  $\vartheta$ ;

$n$  – середня кількість точок, що припадають на одиницю об'єму;

$m$  – вірогідна кількість точок в об'ємі  $\vartheta$

В системі ослаблених точок, розглянутій вище, об'єм, обмежений сусідніми точками, також є випадковим і, згідно з [2], розподіляється за показниковим законом, диференціальна функція якого (густина) має вигляд

$$p_\vartheta = \begin{cases} ne^{-n\vartheta}, & \text{якщо } \vartheta \geq 0, \\ 0, & \text{якщо } \vartheta < 0. \end{cases}$$

Ця функція відображає гранулометричний склад по кількості кусків різних об'ємів. Для розв'язку практичних задач прийнято виходити з гранулометричного об'єму кусків різної величини. Знайдемо функцію розподілу кусків по об'єму.

Точка В перетину кривої з віссю  $\sigma$  дає величину теоретичної міцності монолітної породи.

Таким чином, функція роздрібненості охоплює дуже широке коло властивостей породи – від інтенсивності тріщинуватості до її теоретичної міцності, отже являється представницьким параметром, що характеризує властивість середовища роздрібнюватися на куски різноманітних розмірів.

Функція  $n = f(\sigma)$  зростаюча, бо при зростанні напруг весь час буде

Густість функції розподілу величини об'єму також можна представити наступним чином

$$p_g = \frac{n_g}{N},$$

де  $n_g$  – вірогідна кількість кусків заданої величини, що утворилась в загальному об'ємі  $V$ ;

$N$  – загальна кількість кусків, які утворилися,  $N = nV$ .

Отже, 
$$\frac{n_g}{nV} = ne^{-ng}.$$

Звідки 
$$n_g = n^2 e^{-ng}.$$

Якщо вказану рівність помножити на  $g$ , то лівій частині виразу  $n_g g = n^2 g e^{-ng}$  буде вірогідний сумарний об'єм кусків величиною  $g$ , який позначено  $V_n$ .

Тоді 
$$f(g) = \frac{V_n}{V},$$

де  $f(g)$  – густість функції розподілу сумарного об'єму кусків різноманітної величини.

Після нескладних перетворень буде  $f(g) = n^2 g e^{-ng}$ .

Графік цієї функції для випадку, коли кількість ослаблених точок  $n=2$ , показано на рис. 4.

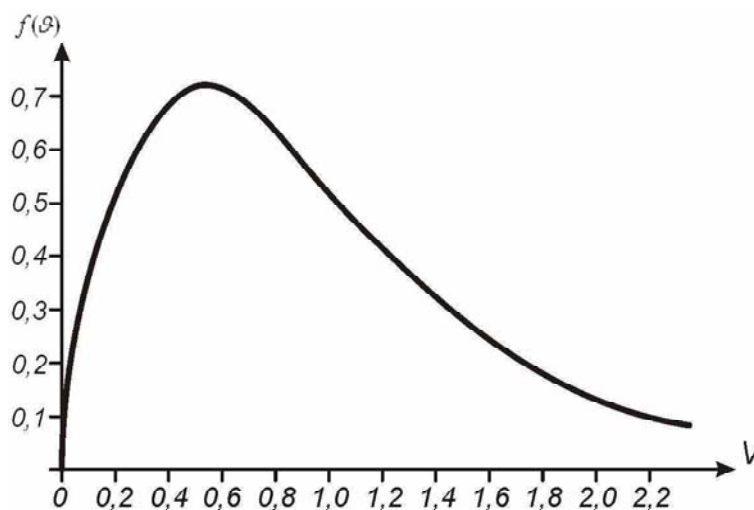


Рис. 4. Графік диференційної функції розподілу сумарного об'єму кусків, при  $n = 2$

Середня за об'ємом величина кусків визначається математичним очікуванням  $M(g)$  за правилом

$$M(\vartheta) = \int_0^{\infty} \vartheta f(\vartheta) d\vartheta$$

Після інтегрування вказаного невластного інтеграла буде

$$M(\vartheta) = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b n^2 \vartheta^2 e^{-n\vartheta} d\vartheta = \frac{2}{n}$$

У зв'язку з тим, що  $f(\sigma) = \frac{1}{n}$ , буде

$$f(\vartheta) = \left( \frac{1}{f(\sigma)} \right)^2 \vartheta e^{-\frac{\vartheta}{f(\sigma)}}$$

$$M(\vartheta) = 2f(\sigma)$$

Якщо на масив гірничих порід з відомою функцією роздрібненості діяла напруга  $\sigma_1$  впродовж часу, достатнього для зімкнення тріщин, то гранулометричний склад одержаної гірничої маси визначається функцією

$$f(\vartheta) = \left( \frac{1}{f(\sigma_1)} \right)^2 \vartheta e^{-\frac{\vartheta}{f(\sigma_1)}}$$

а середній кусок  $M(\vartheta) = 2f(\sigma_1)$ .

Створити універсальну фізичну модель формування поля напруг і гранулометричного складу гірничої маси під впливом вибраних параметрів БВР в нестабільних гірничо-геологічних умовах, придатну для ефективного використання на підприємствах (тобто розгадати вміст «чорного ящика»), дуже складно, практично неможливо. Тому обґрунтована доцільність впровадження статистичних методів дослідження, як основи для прийняття інженерних рішень при проектуванні масових вибухів. З точністю, домінуючою в гірничій справі, виконано достатньо широке інформаційне забезпечення таких досліджень.

На окремому блоці розробляємих порід електронним приладом контролювались їх міцність і тріщинуватість, реєструвались складові питомого заряду вибухової речовини – величина свердловинного заряду, розміри сітки свердловин і висота уступу, а також вимірювались кусковатість гірничої маси з подальшим обчисленням узагальнюючих показників, що однозначно характеризують якість проведеного вибуху.

В результаті застосування статистичних методів обробки і дослідження вказаної інформації, накопиченої за різними блоками скельових порід, одержана наступна експериментальна залежність між тісно корелюючими змінними

$$\begin{cases} g = \frac{\sqrt{\Delta f}}{\ln(kx_{max})} \\ g = \frac{Q}{abh} \end{cases} \text{ кг/м}^3$$

де  $g$  – питомий заряд вибухової речовини,  $x_{\max}, \Delta$  – відповідно, розмір і доля домінуючої фракції в загальному об’ємі гірничої маси;

$f$  – коефіцієнт міцності порід за Протодьяконовим;

$k$  – коефіцієнт природної блочності порід, який визначається кількістю тріщин по висоті уступу. Для залізорудних родовищ за статистичними дослідженнями його значення наведені в табл. 1;

$Q$  – величина свердловинного заряду;

$a, b$  – розміри сітки свердловин;

$h$  – висота уступу, в подальших розрахунках використано технологічне її значення,  $h = 10$ .

Таблиця 1

Експериментально обґрунтовані значення коефіцієнта природної блочності порід, рекомендовані для розрахунку питомих зарядів вибухової речовини

Кількість тріщин $n \in (n_1; n_2]$	(0;5]	(5;10]	(10;15]	(15;20]	(20;25]	$n > 25$
Тип порід	вельми крупно-блочні	крупно-блочні	середньо-блочні	мало-блочні	сильно подрібнені	вельми сильно подрібнені
Значення коефіцієнта,	100	150	200	250	300	350

Рекомендована наступна стратегія прийняття раціональних рішень при проектуванні і виконанні масових вибухів на кар’єрах:

1. На основі даних електронного приладу визначається вірогідний коефіцієнт міцності порід блоку по вибірковим свердловинам і інтервал  $(n_1; n_2]$ , до якого відносяться ці породи за тріщинуватістю.

2. За табл. 1 для встановленого інтервалу визначається коефіцієнт природної блочності,  $k$ .

3. Задаються економічно обґрунтованими значеннями  $x_{\max}$  і  $\Delta$ . При цьому повинна виконуватись умова

$$\frac{h}{n_1} > x_{\max} > \frac{h}{n_2}$$

4. За першою формулою системи для встановлених значень  $f, k, x_{\max}, \Delta$  обчислюється величина питомого заряду вибухової речовини.

5. На основі досвіду виконання буро-вибухових робіт в умовах, близьких до зафіксованих, визначаються розміри сітки свердловин,  $(a, b)$ .

6. Для знайдених значень  $g, a, b$  за другою формулою системи обчислюється величина свердловинного заряду,  $Q$ . При цьому максимальне його значення обмежується ємністю свердловини; якщо розрахункова величина заряду



за ємністю буде займати менше половини висоти свердловини, необхідно застосувати його розсереджену конструкцію.

7. За одержаними значеннями  $g, a, b, Q$  і типом конструкції свердловинного заряду складається паспорт на виконання масового вибуху.

За приведеною методикою статистичних досліджень обчислені питомі заряди штатної вибухової речовини для деяких умов родовищ залізних руд, табл. 2.

Таблиця 2

Рекомендовані значення питомих зарядів вибухової речовини і прогнозовані показники гірничої маси

Коефіцієнт міцності порід за Протодьяконовим, $f$	Коефіцієнт природної блочності порід, $k$	Розмір домінуючої фракції в гірничій масі, $x_{\max}$	Доля домінуючої фракції, $\Delta$	Питомі заряди вибухової речовини, $g$ , кг/м <sup>3</sup>
18	100	0,2	0,3	0,77
			0,5	1,0
			0,7	1,2
		0,3	0,3	0,68
			0,5	0,89
			0,7	1,0
	200	0,2	0,3	0,63
			0,5	0,81
			0,7	0,96
		0,3	0,3	0,57
			0,5	0,73
			0,7	0,87
	300	0,2	0,3	0,57
			0,5	0,73
			0,7	0,87
		0,3	0,3	0,51
			0,5	0,67
			0,7	0,79

В перспективі ці положення складуть реальні передумови для створення алгоритму оптимального управління комплексом БВР на відкритих розробках родовищ скельових корисних копалин.

#### Список літератури

1. Щербаков П.Н., Ткаченко В.М., Пульянович С В . Метод оперативной оценки крепости и трещиноватости горных пород при производстве буровзрывных работ на карьерах. - «Горный журнал», 1983, № 7, с.35-37.
2. Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А. Теория вероятностей. М., изд-во «Наука», 1967.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Дриженком А.Ю.  
Надійшла до редакції 02.11.10*