

ВПЛИВ ТИСКУ ГАЗІВ ВИБУХУ
НА ОБ'ЄМ РУЙНУВАННЯ СКЕЛЬНИХ ПОРІД

Наведено метод розрахунку об'єму руйнування гірського масиву вибухом з урахуванням хвиль напружень. Встановлено вплив тиску газів вибуху на характер руйнування. Отримана залежність між середнім значенням тиску газів вибуху і об'ємом руйнування скельних порід при вибуху свердловинного заряду.

Вступ. При проектуванні та проведенні підричних робіт на гірничих підприємствах поряд з фізико-механічними властивостями гірських порід і умовами їх залягання враховують також тип застосовуваної вибухової речовини (ВР). Однією з основних характеристик промислових ВР є тиск газів вибуху на стінки зарядної порожнини. Тому дослідження по встановленню впливу тиску газів вибуху промислових ВР на об'єм руйнування масиву гірських порід є, безумовно, актуальними.

Аналіз досліджень. Вплив типу ВР, а відповідно і тиску газів вибуху, на характер руйнування скельних порід при проведенні масових вибухів на кар'єрах є об'єктом досліджень впродовж багатьох років, оскільки від правильності вибору типу ВР і параметрів буропідричних робіт (БПР) залежить вартість та якість подрібнення масиву гірських порід. Найбільш достовірними є експериментальні дослідження, які виконуються методом воронкоутворення в конкретних гірничо-геологічних умовах [1]. Однак вони є досить трудомісткими і тому не набули широкого розповсюдження.

Встановити наближено форму та об'єм воронки подрібнення при вибуху подовженого заряду ВР в скельних породах дозволяють також розрахункові методи [2, 3]. Однак, на думку авторів [4], такі дослідження все ж таки не відображують експериментальних даних, особливо для умов гірських масивів порушеної структури.

Постановка задачі досліджень. Враховуючи недоліки наведених вище методів дослідження, пропонується на основі нового розрахункового методу дослідити вплив газів вибуху на об'єм руйнування масиву гірських порід при вибуху свердловинного заряду та встановити між ними графічну та аналітичну залежність.

Викладення матеріалу. Для розв'язання задачі досліджень рекомендується використовувати просторову задачу про поширення хвиль напружень, утворених при вибуху подовжених зарядів ВР [5], оскільки вважається, що ці хвилі створюють напружений стан у гірському масиві, що є причиною виникнення мікро- та макротріщин [6].

В цій розрахунковій схемі використовуються хвильові рівняння руху середовища [7]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Phi(r, z, t) = 0;$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c_t^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Psi(r, z, t) = 0,$$
(1)

де r – радіальна координата; z – осьова координата; t – час; c_l – швидкість поширення подовжніх хвиль у породі; c_t – швидкість поширення поперечних хвиль у породі; $\Phi(r, z, t)$, $\Psi(r, z, t)$ – хвильові потенціали.

Напруження визначаються через відомі потенціали:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial z} \right) + \frac{\lambda}{c_l^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}; \\ \sigma_{rz} = 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial z} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + \rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \end{cases}$$
(2)

де ρ – щільність гірської породи; λ , μ – коефіцієнти Ляме:

$$\lambda = \frac{n E}{(1+n)(1-2n)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1+n)},$$
(3)

де E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуасона.

Порівнюючи визначені напруження, які утворюються при вибуху в будь-якій точці масиву гірських порід, з межею міцності даної породи, встановлюється можливість руйнування в цій точці.

Граничними умовами при вибуху подовженого заряду ВР є:

$$\begin{cases} \sigma_{rr}|_{r=r_0} = -P(z,t); \\ \sigma_{rz}|_{z=0} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де $P(z, t)$ – середній початковий тиск на стінки зарядної порожнини в цей момент часу.

Для отримання чисельних результатів при розв’язанні таких просторових задач використовуємо чисельний метод сіток [8].

У цьому випадку рівняння (1) і граничні умови (4) можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\Phi_{i+1,j}^k - 2\Phi_{i,j}^k + \Phi_{i-1,j}^k}{(\Delta r)^2} + \frac{\Phi_{i+1,j}^k - \Phi_{i-1,j}^k}{2\Delta r((i-0,5)\Delta r + r_0)} + \frac{\Phi_{i,j+1}^k - 2\Phi_{i,j}^k + \Phi_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} - \\ - \frac{1}{c_t^2} \frac{\Phi_{i,j}^{k+1} - 2\Phi_{i,j}^k + \Phi_{i,j}^{k-1}}{(\Delta t)^2} = 0; \\ \frac{\Psi_{i+1,j}^k - 2\Psi_{i,j}^k + \Psi_{i-1,j}^k}{(\Delta r)^2} + \frac{\Psi_{i+1,j}^k - \Psi_{i-1,j}^k}{2\Delta r((i-0,5)\Delta r + r_0)} + \frac{\Psi_{i,j+1}^k - 2\Psi_{i,j}^k + \Psi_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} - \\ - \frac{\Psi_{i,j}^k}{((i-0,5)\Delta r + r_0)^2} - \frac{1}{c_t^2} \frac{\Psi_{i,j}^{k+1} - 2\Psi_{i,j}^k + \Psi_{i,j}^{k-1}}{(\Delta t)^2} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_{rr}|_{r=r_0} = 2\mu \left[\frac{\Phi_{3,j}^k - 2\Phi_{2,j}^k + \Phi_{1,j}^k}{(\Delta r)^2} - \frac{\Psi_{2,j+1}^k - \Psi_{1,j+1}^k - \Psi_{2,j-1}^k + \Psi_{1,j-1}^k}{2\Delta r\Delta z} \right] + \\ + \frac{\lambda}{c_t^2} \frac{\Phi_{1,j}^{k+1} - 2\Phi_{1,j}^k + \Phi_{1,j}^{k-1}}{(\Delta t)^2} = -P(z,t); \\ \sigma_{rz}|_{z=0} = 2\mu \left[\frac{\Phi_{i+1,2}^k - \Phi_{i-1,2}^k - \Phi_{i+1,1}^k + \Phi_{i-1,1}^k}{2\Delta z\Delta r} - \frac{\Psi_{i,3}^k - 2\Psi_{i,2}^k + \Psi_{i,1}^k}{(\Delta z)^2} \right] + \\ + \rho \frac{\Psi_{i,1}^{k+1} - 2\Psi_{i,1}^k + \Psi_{i,1}^{k-1}}{(\Delta t)^2} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Із системи рівнянь (5) і (6) можна виразити значення потенціалів у момент часу $k+1$ через їхні значення k і $k-1$:

$$\begin{cases} \Phi_{i,j}^{k+1} = 2\Phi_{i,j}^k - \Phi_{i,j}^{k-1} + c_t^2(\Delta t)^2 \times \left[\frac{\Phi_{i+1,j}^k - 2\Phi_{i,j}^k + \Phi_{i-1,j}^k}{(\Delta r)^2} + \right. \\ \left. + \frac{\Phi_{i+1,j}^k - \Phi_{i-1,j}^k}{2\Delta r((i-0,5)\Delta r + r_0)} + \frac{\Phi_{i,j+1}^k - 2\Phi_{i,j}^k + \Phi_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} \right]; \\ \Psi_{i,j}^{k+1} = 2\Psi_{i,j}^k - \Psi_{i,j}^{k-1} + c_t^2(\Delta t)^2 \left[\frac{\Psi_{i+1,j}^k - 2\Psi_{i,j}^k + \Psi_{i-1,j}^k}{(\Delta r)^2} - \frac{\Psi_{i,j}^k}{((i-0,5)\Delta r + r_0)^2} + \right. \\ \left. + \frac{\Psi_{i+1,j}^k - \Psi_{i-1,j}^k}{2\Delta r((i-0,5)\Delta r + r_0)} + \frac{\Psi_{i,j+1}^k - 2\Psi_{i,j}^k + \Psi_{i,j-1}^k}{(\Delta z)^2} \right]. \end{cases} \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_{1,j}^{k+1} &= -P(z,t)(\Delta t)^2 \frac{c_l^2}{\lambda} + 2\Phi_{1,j}^k - \Phi_{1,j}^{k-1} - 2\mu \frac{c_l^2}{\lambda} (\Delta t)^2 \left[\frac{\Phi_{3,j}^k - 2\Phi_{2,j}^k + \Phi_{1,j}^k}{(\Delta r)^2} - \frac{\Psi_{3,j+1}^k - 2\Psi_{2,j}^k + \Psi_{1,j-1}^k}{\Delta r \Delta z} \right]; \\ \Psi_{i,1}^{k+1} &= 2\Psi_{i,1}^k - \Psi_{i,1}^{k-1} - 2\mu \frac{(\Delta t)^2}{\rho} \times \left[\frac{\Phi_{i+1,3}^k - 2\Phi_{i,2}^k + \Phi_{i-1,1}^k}{\Delta z \Delta r} - \frac{\Psi_{i,3}^k - 2\Psi_{i,2}^k + \Psi_{i,1}^k}{(\Delta z)^2} \right]. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Однак при створенні розрахункової програми друге рівняння для хвильового потенціалу зміщення Ψ у формулі (1) і гранична умова на вільній поверхні в (4) були виключені з розрахунків. Це обумовлено двома факторами. По-перше, аналіз системи диференціальних рівнянь показує, що різницева схема, яка використовується в розрахунках, є нестійкою по Ψ . Це пояснюється тим, що якщо розбиття на елементи, які рівні лінійному розміру елементарного об'єму куска гірської породи, становить менше $\sqrt{2}$, то наявність складової $\frac{1}{r^2}\Psi$ у другому рівнянні призводить до некоректного від'ємного результату. По-друге, сама система рівнянь (1) описує розповсюдження хвиль в безмежному просторі з безмежною циліндричною порожниною, і тому введення граничної умови на вільній поверхні виглядає некоректним.

Отже, розв'язується крайова задача (1) з рівнянням тільки по Φ з граничною умовою (4) тільки для σ_{rr} .

В даному методі розрахунку враховуються також:

– вплив глибини h на процес руйнування (гідростатичний тиск, витрати енергії на розкидання і винесення зруйнованої гірської породи та інш.). Для цього до критичних значень напружень руйнування на розтягнення і стиснення додаються (або віднімаються) наступні величини:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{кр}^t &= \pm k_1 h^{n_1}; \\ \sigma_{кр}^c &= \pm k_2 h^{n_2}, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

де k_1 і k_2 – параметри, які враховують гідростатичний тиск; n_1 і n_2 – параметри, які враховують всі інші затрати енергії;

– затухання хвиль напружень, тобто кожне остаточне значення напруження буде представлено у вигляді:

$$\sigma = \frac{\sigma_p}{r^n}, \quad (10)$$

де σ_p – розрахункове значення напруження, отримане безпосередньо за формулою (2); r – відстань від осі свердловини до розрахункової точки; n – ступінь затухання хвиль, значення якого розраховується за формулою [9]:

$$n = 1 + \frac{\nu}{1-\nu}. \quad (11)$$

Розраховані в програмі напруження порівнюються в кожному елементарному об'ємі з критичними напруженнями руйнування гірської породи на розтягнення та стиснення. Якщо в якийсь момент часу розрахункові напруження будь-якої точки перевищують критичні значення, то цей об'єм гірської породи вважається зруйнованим. Таким чином, після закінчення роботи програми можна встановити геометрію і об'єм руйнування.

Для дослідження впливу тиску газів вибуху на об'єм руйнування масиву гірських порід прийняті наступні постійні характеристики:

параметри свердловинного заряду: довжина свердловини – 14 м; діаметр свердловини – 200 мм;

параметри масиву гірських порід: гірська порода – магнетитовий кварцит; щільність породи ρ – 3400 кг/м³; критичне значення напруження руйнування на розтягнення $\sigma_{кр}^t$ – 2,08·10⁷ Па; критичне значення напруження руйнування на стиснення $\sigma_{кр}^c$ – 2,1·10⁸ Па; критичне значення напруження руйнування на зсув $\sigma_{кр}^r$ – 1,3·10⁸ Па; швидкість поширення поздовжніх хвиль у породі c_l – 4970 м/с; швидкість поширення поперечних хвиль у породі c_t – 4200 м/с; модуль пружності – 8,4·10¹⁰ Па; коефіцієнт Пуасона ν – 0,26;

вплив гідростатичного тиску та інших витрат енергії, зокрема на розкидання та винесення зруйнованої гірської породи враховується у відповідності до формул (9), Па:

$$\sigma_{кр}^t = \rho gh^{n_1} = 34\,000h^{2,8};$$

$$\sigma_{кр}^c = \rho gh^{n_2} = 34\,000h^{2,8};$$

ступінь затухання хвиль напружень n згідно з формулою (11) – 1,4.

Перше значення тиску на стінки зарядної порожнини приймається, виходячи з максимального значення тиску, який створюється найпотужнішою промисловою ВР (Акватол Т20-Г – $4,8 \cdot 10^9$ Па) і становить $5 \cdot 10^9$ Па. Подальші значення зменшуються від попереднього спочатку на 10^9 Па, а потім, при значному зменшенні об'єму руйнування, на 10^8 Па від попереднього і т.д. до моменту встановлення значення тиску, при якому руйнування гірського масиву не відбудеться, тобто $V = 0$ (табл. 1).

Таблиця 1.

Значення тиску газів вибуху та відповідні їм результати розрахунку об'єму руйнування масиву гірських порід

$P, \text{Па}$	$V, \text{м}^3$	$P, \text{Па}$	$V, \text{м}^3$	$P, \text{Па}$	$V, \text{м}^3$
$5 \cdot 10^9$	1189,030	$3 \cdot 10^8$	339,668	$1 \cdot 10^7$	49,512
$4 \cdot 10^9$	1080,834	$2 \cdot 10^8$	279,350	$9 \cdot 10^6$	41,216
$3 \cdot 10^9$	958,562	$1 \cdot 10^8$	199,680	$8 \cdot 10^6$	22,494
$2 \cdot 10^9$	802,740	$9 \cdot 10^7$	188,748	$7 \cdot 10^6$	19,730
$1 \cdot 10^8$	591,122	$8 \cdot 10^7$	176,682	$6 \cdot 10^6$	15,960
$9 \cdot 10^8$	563,224	$7 \cdot 10^7$	166,002	$5 \cdot 10^6$	8,042
$8 \cdot 10^8$	534,448	$6 \cdot 10^7$	153,562	$4 \cdot 10^6$	2,514
$7 \cdot 10^8$	503,534	$5 \cdot 10^7$	138,858	$3 \cdot 10^6$	0,252
$6 \cdot 10^8$	470,738	$4 \cdot 10^7$	123,276	$2 \cdot 10^6$	0
$5 \cdot 10^8$	430,648	$3 \cdot 10^7$	103,798		
$4 \cdot 10^8$	386,920	$2 \cdot 10^7$	83,818		

Згідно з розрахунковими значеннями (табл. 1) побудована залежність між середнім значенням тиску газів вибуху P і об'ємом руйнування масиву гірських порід V (рис. 1). З рисунка видно, що залежність $P = f(V)$ можна описати поліноміальною функцією n -го порядку. У зв'язку з цим, поліном 3-го порядку буде мати вигляд: $P = 2,509 + 0,00565V + 0,00216V^2 + 1,157 \cdot 10^{-6}V^3$.

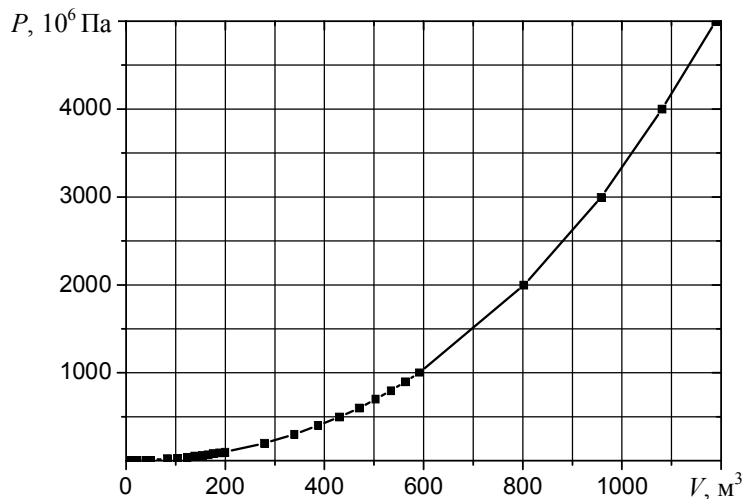


Рис. 1. Залежність між середнім значенням тиску газів вибуху P і об'ємом руйнування масиву гірських порід V при вибуху свердловинного заряду

Висновки. В результаті наведених досліджень встановлено, що:

розв'язанням просторової задачі про поширення хвиль напружень можна дослідити вплив тиску газів вибуху на об'єм руйнування скельних порід;

наведений метод розрахунку руйнування гірського масиву враховує властивості гірських порід, характеристику вибухової речовини, параметри свердловинного заряду, а також інші затрати енергії вибуху;

встановлена залежність між середнім значенням тиску газів вибуху P і об'ємом руйнування масиву гірських порід V при вибуху свердловинного заряду.

Перспективність подальших досліджень визначається можливістю вивчення впливу властивостей гірських порід на закономірності подрібнення масиву.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Воробьев В.Д.* Методы дробления анизотропных пород на основе регулирования параметров импульса взрыва комбинированных зарядов: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.11. – К., 1995. – 419 с.
2. *Фролов О.О.* Встановлення закономірностей зміни радіуса зони дроблення при руйнуванні масивів скельних порід // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – К.: НТУУ "КПІ". – 2000. – Вип. 2. – С. 58–63.
3. *Фролов А.А.* Влияние скорости детонации линейного инициатора на объем воронки дробления // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – К.: НТУУ "КПІ". – 2000. – Вип. 3. – С. 51–57.
4. *Воробьев В.Д., Масюкевич А.М., Косьмин И.В.* О радиусе воронки дробления в скальных породах при взрыве удлиненного заряда взрывчатого вещества // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – К.: НТУУ "КПІ". – 2002. – Вип. 7. – С. 44–54.
5. Разрушение горных пород энергией взрыва / Под ред. Э.И. Ефремова. – Киев: Наук. думка, 1987. – 264 с.
6. Прогнозирование дробления горных массивов взрывом / Е.И. Ефремов, В.Д. Петренко, А.И. Пастухов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 120 с.
7. *Новацкий В.* Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
8. *Фролов О.О.* Особливості розрахунку об'єму руйнування скельних порід під час вибуху свердловинного заряду з урахуванням хвиль напружень // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. – К.: НТУУ "КПІ". – 2006. – Вип. 14. – С. 93–101.
9. *Цай Л.А.* Метод управления энергией взрыва для разрушения массива горных пород // Взрыв. дело. – № 86/43. – М.: Недра, 1984. – С. 167–173.

ФРОЛОВ Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;
- гірництво.

Тел. (044) 406-80-08.

Подано 06.04.2007

А.А. Фролов

Влияние давления газов взрыва на объем разрушения скальных пород

Приведен метод расчета объема разрушения горного массива взрывом с учетом волн напряжений. Установлено влияние давления газов взрыва на характер разрушения. Получена зависимость между средним значением давления газов взрыва и объемом разрушения скальных пород при взрыве скважинного заряда.

A.A. Frolov

Influence of explosion gases pressure on volume of rock mass ruining

The method of calculation of rock mass destruction volume at explosion with due consideration of stress waves is presented. Influence of explosion gases pressure on character of destruction is established. Dependence between average initial pressure of explosion gases and volume of rock mass ruining at explosion of blasthole charge is built.