

# ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.236.9

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.5.71981

О.М. Терентьев<sup>1</sup>, П.А. Гонтарь<sup>1</sup>, А. Шукуров<sup>2</sup><sup>1</sup>НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна<sup>2</sup>ТОВ “Azinterpartlays-X”

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ КУМУЛЯТИВНОГО ВИБУХОВОГО ЯДРА ПІД ЧАС ВИБУХО-МЕХАНІЧНОГО БУРІННЯ

**Background.** Modern methods of destruction are spending up to 90 % of energy to prepare for extraction. Specific energy consumption reaches 120 kW·h/m<sup>3</sup>. The study proposes a new energy efficient destruction of rocks with combined explosive-mechanical loads.

**Objective.** Evidence of explosion-mechanical action machine's recoil absence during explosive charges detonation.

**Methods.** Determination of the factors that cause machine recoil during explosion; the study of the metal jet behavior at the moment of collision with a stope; research of recoil acceleration, speed and impact energy.

**Results.** It is proved that the metal jet acts as a dynamic indenter directed to a stope. After the collision with a stope it "spreads" laterally and generates micro-cracks within 20 mm from the epicenter.

**Conclusions.** The parameters of the machine recoil (acceleration of 0.0002 m/s<sup>2</sup>; energy 0.02 J) prove the absence of its horizontal and vertical movements during the explosion-mechanical destruction of rocks.

**Keywords:** destruction of rocks; explosive-mechanical drilling; energy saving; combined loading; metal jet.

### Вступ

Сумарні запаси природного декоративного каменю в Україні становлять понад 500 млн м<sup>3</sup> [1]. Розвідані запаси на 74 % (118 млн м<sup>3</sup>) [1] складаються з граніту, габро, лабрадориту – скельних гірських порід (ГП). Буріння шпурів у цих породах характеризується енергоємністю понад 120 кВт·год/м<sup>3</sup> [2]. Це зумовлено тим, що, згідно з діаграмою деформування [3], близько 90 % енергії витрачається на “підготовку” ГП до руйнування, тобто на досягнення навантаженням границі міцності матеріалу, що руйнується.

Зростання вартості енергоресурсів сприяє розробці енергоощадних способів буріння спеціального призначення. Аналіз фундаментальних праць з теорії вибуху Ф.А. Баума, В.В. Бойка, О.О. Вовка, В.Г. Кравця, М.О. Лаврентьева, Л.П. Орленка, К.П. Станюковича, В.Е. Фортва [4–11] привів до розробки вибухо-механічного способу руйнування ГП [12]. Спосіб [12] полягає в періодичній подачі зарядів вибухової речовини (ВР) по продувному каналу до вибивання шпурів під час його обертового буріння. Заряди ВР мають кумулятивне півсферичне облицювання для формування кумулятивного вибухового ядра (КВЯ). Вплив КВЯ на вибій послаблює ГП через формування внесеної технологічної тріщинуватості, додатково до існуючої природної. В результаті знижуються міцнісні властивості ГП і витрати енергії на вибухо-механічне руйнування. При цьому актуальним є встановлення енергетичних параметрів КВЯ для безпечної реалізації вибухо-механічного буріння шпурів.

На вирішення цього питання спрямовано наше дослідження.

### Постановка задачі

Метою дослідження є встановлення енергетичних параметрів КВЯ.

### Параметри вибуху з формуванням кумулятивного вибухового ядра

Запропонований спосіб руйнування ГП [12] розроблено для формування шпурів у особливих умовах (вічної мерзлоти, за знижених тисків), де застосування промивної рідини неможливе. Для реалізації способу передбачено кумулятивні заряди ВР (суміш КСіО<sub>4</sub> та Mg) масою 0,0005 кг. Заряди мають циліндричну форму (діаметром 10 мм і висотою 20 мм) та алюмінієве півсферичне облицювання для формування КВЯ.

Кисневий баланс суміші КСіО<sub>4</sub> (компонент № 1) та Mg (компонент № 2) рівний [13]

$$\begin{aligned}
 KB &= \frac{\left[ d_1 - \left( 2 \cdot a_1 + \frac{b_1}{2} \right) \right] \cdot 16}{M_1} \cdot P_1 \cdot 100 + \\
 &+ \frac{\left[ d_2 - \left( 2 \cdot a_2 + \frac{b_2}{2} \right) \right] \cdot 16}{M_2} \cdot P_2 \cdot 100 = \\
 &= \frac{\left[ 4 - \left( 2 \cdot 0 + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot 16}{138,5} \cdot 0,6 \cdot 100 +
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{\left[0 - \left(2 \cdot 1 + \frac{0}{2}\right)\right] \cdot 16}{24,3} \cdot 0,4 \cdot 100 = -28,4 \%,$$

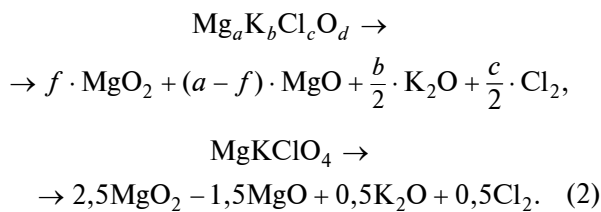
де  $d_1 = 4$  – число атомів кисню в  $\text{KClO}_4$ , атомів;  $a_1 = 0$  – число атомів магнію в  $\text{KClO}_4$ , атомів;  $b_1 = 1$  – число атомів калію в  $\text{KClO}_4$ , атомів;  $M_1 = 138,5$  – молярна маса перхлорату калію, [14], г/моль;  $P_1 = 0,6$  – частка  $\text{KClO}_4$  у суміші, згідно з дослідженнями, в.о.;  $d_2 = 0$  – число атомів кисню в  $\text{Mg}$ , атомів;  $a_2 = 1$  – число атомів магнію в  $\text{Mg}$ , атомів;  $b_2 = 0$  – число атомів калію в  $\text{Mg}$ , атомів;  $M_2 = 24,3$  – молярна маса  $\text{Mg}$ , [14], г/моль;  $P_2 = 0,4$  – частка  $\text{Mg}$  у суміші, згідно з дослідженнями, в.о.

Оскільки кисневий баланс від'ємний, то вибрана суміш віднесена до III групи [13]. Відповідно, хімічна формула вибраної суміші набуває вигляду  $\text{Mg}_a\text{K}_b\text{Cl}_c\text{O}_d$ . Тоді рівняння хімічного перетворення визначається за величиною  $f$  [13]:

$$f = d - \left(a + \frac{b}{2}\right) = 4 - \left(1 + \frac{1}{2}\right) = 2,5 \text{ в.о.}, \quad (1)$$

де  $d = 4$  – число атомів кисню в суміші, атомів;  $a = 1$  – число атомів  $\text{Mg}$  в суміші, атомів;  $b = 1$  – число атомів  $\text{K}$  у суміші, атомів.

Для  $f > 2,5$  хімічна реакція вибуху має вигляд



Об'єм газів, що утворюється в результаті вибуху, рівний [13]

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{22,4 \cdot (n_{\text{MgO}_2} + n_{\text{MgO}} + n_{\text{K}_2\text{O}} + n_{\text{Cl}_2})}{M_{\text{MgO}_2} + M_{\text{MgO}} + M_{\text{K}_2\text{O}} + M_{\text{Cl}_2}} \cdot 1000 = \\ &= \frac{22,4 \cdot (2,5 - 1,5 + 0,5 + 0,5)}{56 + 40 + 94,2 + 71} \cdot 1000 = 171,5 \frac{\text{дм}^3}{\text{кг}}, \end{aligned}$$

де  $n_{\text{MgO}_2} = 2,5$  – число молів  $\text{MgO}_2$  з рівняння (2), моль;  $n_{\text{MgO}} = -1,5$  – число молів  $\text{MgO}$  з рівняння (2), моль;  $n_{\text{K}_2\text{O}} = 0,5$  – число молів  $\text{K}_2\text{O}$  з рівняння (2), моль;  $n_{\text{Cl}_2} = 0,5$  – число молів  $\text{Cl}_2$  з

рівняння (2), моль;  $M_{\text{MgO}_2} = 56$  – молярна маса  $\text{MgO}_2$ , [14], г/моль;  $M_{\text{MgO}} = 40$  – молярна маса  $\text{MgO}$ , [14], г/моль;  $M_{\text{K}_2\text{O}} = 94,2$  – молярна маса  $\text{K}_2\text{O}$ , [14], г/моль;  $M_{\text{Cl}_2} = 71$  – молярна маса  $\text{Cl}_2$ , [14], г/моль.

Щільність заряджання становить

$$\Delta_3 = \frac{Q}{V} = \frac{0,0005}{0,001} = 0,5 \frac{\text{кг}}{\text{дм}^3},$$

де  $Q = 0,0005$  – маса ВР, використана в дослідженнях, кг;  $V = 0,001$  – об'єм зарядної камери, використаної в дослідженнях,  $\text{дм}^3$ .

Максимальна температура вибуху суміші  $\text{KClO}_4$  і  $\text{Mg}$  становить

$$\begin{aligned} T &= \frac{-\sum n \cdot a + \sqrt{(\sum n \cdot a)^2 + 4 \cdot \sum n \cdot b \cdot Q_v}}{2 \cdot \sum n \cdot b} = \\ &= \frac{-70,22 + \sqrt{(70,22)^2 + 4 \cdot 0,0037 \cdot 285000}}{2 \cdot 0,0037} = 3436 \text{ К}, \end{aligned}$$

де  $\sum n \cdot a$  та  $\sum n \cdot b$  – сума добутоків відповідно числа молів та емпіричних коефіцієнтів продуктів детонації за Г. Кастом [13],  $Q_v$  – теплота вибуху, кДж.

Сума числа молів обчислюється як

$$\begin{aligned} \sum n \cdot a &= n_{\text{MgO}_2} \cdot a_{\text{MgO}_2} + n_{\text{MgO}} \cdot a_{\text{MgO}} + \\ &+ n_{\text{K}_2\text{O}} \cdot a_{\text{K}_2\text{O}} + n_{\text{Cl}_2} \cdot a_{\text{Cl}_2} = 2,5 \cdot 30,096 - 1,5 \cdot 20,06 + \\ &+ 0,5 \cdot 30,096 + 0,5 \cdot 20,06 = 70,22 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}, \end{aligned}$$

де  $a_{\text{MgO}_2} = 30,096$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [13], Дж;  $a_{\text{MgO}} = 20,06$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [13], Дж;  $a_{\text{K}_2\text{O}} = 30,096$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [13], Дж;  $a_{\text{Cl}_2} = 20,06$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [13], Дж.

Сума емпіричних коефіцієнтів продуктів детонації обчислюється як

$$\begin{aligned} \sum n \cdot b &= n_{\text{MgO}_2} \cdot b_{\text{MgO}_2} + n_{\text{MgO}} \cdot b_{\text{MgO}} + n_{\text{K}_2\text{O}} \cdot b_{\text{K}_2\text{O}} + \\ &+ n_{\text{Cl}_2} \cdot b_{\text{Cl}_2} = 2,5 \cdot 0,001881 - 1,5 \cdot 0,001884 + \\ &+ 0,5 \cdot 0,001881 + 0,5 \cdot 0,001884 = 0,0037 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}, \end{aligned}$$

де  $b_{\text{MgO}_2} = 0,001881$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [13], Дж;  $b_{\text{MgO}} = 0,001884$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [13], Дж;  $b_{\text{K}_2\text{O}} = 0,001881$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для триатомних газів, [13], Дж;  $b_{\text{Cl}_2} = 0,001884$  – температурний коефіцієнт за Г. Кастом для двоатомних газів, [13], Дж.

Теплота вибуху при постійному об'ємі становить

$$\begin{aligned} Q_v &= (n_{\text{MgO}_2} \cdot Q_{\text{MgO}_2} + n_{\text{MgO}} \cdot Q_{\text{MgO}} + n_{\text{K}_2\text{O}} \cdot Q_{\text{K}_2\text{O}} - \\ &- n_{\text{KClO}_4} \cdot Q_{\text{KClO}_4}) + 2,39 \cdot (n_{\text{MgO}_2} + n_{\text{MgO}} + n_{\text{K}_2\text{O}}) = \\ &= (2,5 \cdot 570,14 - 1,5 \cdot 601,8 + 0,5 \cdot 363,2 - 1 \cdot 427,2) + \\ &+ 2,39 \cdot (2,5 + 1,5 + 0,5) = 285 \text{ кДж}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $Q_{\text{MgO}_2} = 570,14$  – теплота утворення  $\text{MgO}_2$ , розрахована за формулою (3), кДж;  $Q_{\text{MgO}} = 601,8$  – теплота утворення  $\text{MgO}$ , [15], кДж;  $Q_{\text{K}_2\text{O}} = 363,2$  – теплота утворення  $\text{K}_2\text{O}$ , [15], кДж;  $n_{\text{KClO}_4} = 1$  – число молів  $\text{KClO}_4$  з рівняння (2), кДж;  $Q_{\text{KClO}_4} = 427,2$  – теплота утворення  $\text{KClO}_4$ , [15], кДж.

Оскільки дані щодо теплоти утворення  $\text{MgO}_2$  відсутні, то її розраховано за законом Г.І. Гесса [13] з рівняння [16]  $\text{MgCO}_3 + \text{O} \rightarrow \text{MgO}_2 + \text{CO}_2$  ( $\Delta H = -117$  кДж/моль).

За законом Г.І. Гесса [13]:

$$\begin{aligned} \Delta H &= (1 \cdot \Delta H_{\text{MgO}_2} + 1 \cdot \Delta H_{\text{CO}_2}) - \\ &- (1 \cdot \Delta H_{\text{MgCO}_3} + 1 \cdot \Delta H_{\text{O}}). \end{aligned}$$

Звідси теплота утворення  $\text{MgO}_2$ :

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{MgO}_2} &= (1 \cdot \Delta H_{\text{CO}_2} - 1 \cdot \Delta H_{\text{MgCO}_3} - 1 \cdot \Delta H_{\text{O}} - \Delta H) = \\ &= (1 \cdot (-393,51) - 1 \cdot (-1095,85) - 1 \cdot 249,2 - (-117)) = \\ &= 570,14 \text{ кДж/моль}, \end{aligned}$$

де  $\Delta H_{\text{CO}_2} = -393,51$  – теплота утворення  $\text{CO}_2$ , [15], кДж/моль;  $\Delta H_{\text{MgCO}_3} = -1095,85$  – теплота утворення  $\text{MgCO}_3$ , [15], кДж/моль;  $\Delta H_{\text{O}} = 249,2$  – теплота утворення  $\text{O}$ , [15], кДж/моль.

Максимальний тиск продуктів детонації вибраної ВР, за рівнянням Ван-дер-Ваальса [13], становить:

$$P = \frac{P_0 \cdot V_0 \cdot T \cdot \Delta}{(1 - \alpha \cdot \Delta) \cdot 273} =$$

$$= \frac{101300 \cdot 171,5 \cdot 3436 \cdot 0,5}{(1 - 0,43 \cdot 0,5) \cdot 273} = 139,27 \text{ МПа},$$

де  $P_0 = 101,3$  – тиск за нормальних умов, [13], кПа;  $\alpha = 0,001 \cdot V_0 = 0,43$  – об'єм газів, що не стискаються,  $\text{м}^3$  [13].

Згідно з [4], швидкість розльоту продуктів детонації обчислюється як

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{D}{n+1} \sqrt{\frac{4 \cdot n^2}{(n-1)^2} + 1} = \\ &= \frac{2100}{2,2+1} \sqrt{\frac{4 \cdot 2,2^2}{(2,2-1)^2} + 1} = 2493 \text{ м/с}, \end{aligned}$$

де  $D = 2100$  – швидкість детонації ВР на основі  $\text{KClO}_4$ , [14], м/с;  $n = 2,2$  – показник політропи, що залежить від щільності ВР, [13], в.о.

Отже, ВР (суміш  $\text{KClO}_4$  і  $\text{Mg}$ ) зі швидкістю детонації 2100 м/с, швидкістю розльоту продуктів детонації 2493 м/с і питомим тиском 293 МПа/кг формує КВЯ. За формулою М.О. Лаврентьєва [8], швидкість КВЯ становить

$$V_K = u_0 \frac{1 + \cos \beta}{\sin \beta} = 2100 \cdot \frac{1 + 0,50}{0,86} = 3662 \text{ м/с}, \quad (4)$$

де  $\beta = 60^\circ$  – кут між віссю заряду та кумулятивним півсферичним облицюванням, за конструкцією використаного в дослідженнях заряду.

Тиск КВЯ, згідно з [4], обчислюється як

$$\begin{aligned} P_K &= \frac{\rho_1 \cdot V_K^2}{\left( \sqrt{\alpha_1} + \sqrt{\alpha_2 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}} \right)^2} = \\ &= \frac{2430 \cdot 3662^2}{\left( \sqrt{13,22} + \sqrt{18,25 \cdot \frac{2430}{2680}} \right)^2} = 550 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

де  $\rho_1 = 2430$  – щільність КВЯ, [4], 90 % від щільності алюмінію 2700 [15],  $\text{кг/м}^3$ ;  $\alpha_1 = 13,22$  – стисливість КВЯ, [16], значення покладається для алюмінію,  $\text{Па}^{-1}$ ;  $\alpha_2 = 18,25$  – стисливість граніту, [16],  $\text{Па}^{-1}$ ;  $\rho_2 = 2680$  – щільність граніту, вибрана для досліджень,  $\text{кг/м}^3$ .

Радіус КВЯ, за М.О. Лаврентьєвим [8], становить

$$r = \sqrt{2 \cdot R \cdot h} \sin \left( \frac{\alpha}{2} \right) = \sqrt{2 \cdot 5 \cdot 10} \sin \left( \frac{60}{2} \right) = 5,0 \text{ мм},$$

де  $R = 5$  – радіус заряду, згідно з дослідженнями, мм;  $h = 10$  – висота облицювання, згідно з дослідженнями, мм.

Згідно з розрахунками, швидкість детонації (2100 м/с) зумовлює формування КВЯ зі швидкістю 3662 м/с. Це підтверджено дослідженнями академіка М.О. Лаврентьєва [8]: “У початковий момент усі елементи оболонки набувають швидкості близько 2 км/с ... відбувається обтискання ... у результаті цього витискається струмінь ... тут швидкості становлять близько 2...10 км/с”. Отже, КВЯ виконує функцію динамічного індетора, спрямованого на вибій, як куля, що вилетіла зі ствола вогнепальної зброї. Тому визначення параметрів віддачі установки доцільно розраховувати за швидкістю розльоту продуктів детонації (1).

#### Параметри віддачі експериментальної установки від вибуху

Визначення прискорення віддачі установки внаслідок дії вибуху проведено із застосуванням рівняння І.В. Мещерського [17], що описує рух тіл зі змінною масою в системі ракета–потік газів:

$$m_y \cdot a_y = F_0 - u_0 \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \Rightarrow \\ \Rightarrow a_y = -2493 \cdot \frac{0,0005}{50 \cdot 100} = 0,0002,$$

де  $m_y = 100$  – маса експериментальної установки, кг;  $a_y$  – прискорення установки, м/с<sup>2</sup>;  $F_0 = 0$  – зовнішні сили, що діють на установку, значення покладається умовно без урахування сили тяжіння та тертя, Н;  $\Delta m = 0,0005$  – зміна маси палива, маса ВР у заряді, що перетворюється на продукти детонації під час вибуху, кг;  $\Delta t = 50$  – мінімальний інтервал часу між детонаціями зарядів, згідно з дослідженнями, для забезпечення охолодження різців, с.

Згідно з розрахунками рівняння І.В. Мещерського [17], прискорення експериментальної установки внаслідок вибуху заряду рівне 0,0002 м/с<sup>2</sup>. З урахуванням того, що тривалість вибуху 9 мкс, швидкість установки за цей час досягне  $V = 0,0002 \times 0,000009 = 1,8$  нм/с. Це доводить, що віддача установки недостатня для подолання сили тяжіння. Проте рівняння І.В. Мещерського [17] недоцільно застосовувати для цього випадку, оскільки воно описує рух тіл із постійно змінною масою та з постійним виділенням газів. Установку вибухо-механічної дії має незмінну масу 100 кг (масою зарядів 0,0005 кг нехтуємо), а виділення газів має імпульсний характер (трива-

лість вибуху 9 мкс) з максимальною частотою 20 мГц. Така особливість роботи схожа на дію вогнепальної зброї. Тому для розрахунку швидкості віддачі використано закон збереження імпульсу [18]:

$$m_y \cdot V_y = m_0 \cdot u_0 + m_k \cdot V_k \Rightarrow \\ \Rightarrow V_y = \frac{2493 \cdot 0,0005 + 3662 \cdot 0,0005}{100} = 0,03 \text{ м/с,}$$

де  $m_0 = 0,0005$  – маса продуктів детонації, умовно за масою ВР, кг;  $V_k = 3662$  – швидкість КВЯ, згідно з (4), м/с;  $m_k = 0,0005$  – маса КВЯ, умовно за масою облицювання, кг.

Імпульс віддачі установки:

$$P_y = m_y \cdot V_y = 100 \cdot 0,03 = 3 \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Енергія віддачі установки:

$$E = \frac{P_y^2}{2 \cdot m_y} = \frac{9}{2 \cdot 100} = 0,04 \text{ Дж.}$$

Оскільки експериментальна установка розміщена горизонтально, то силі віддачі протистоять сила тертя, що рівна  $F = 100 \cdot 10 \cdot 0,5 = 500$  Н (0,5 – коефіцієнт тертя метал–дерево [19]). Для зміщення установки на 0,001 м необхідна енергія  $E = 500 \cdot 0,001 = 0,5$  Дж. Тому енергії віддачі 0,04 Дж недостатньо для подолання сили тертя. А щоб відірвати установку масою 100 кг на висоту в 0,001 м, необхідна потенційна енергія 1 Дж.

#### Зіткнення кумулятивного вибухового ядра з гірською породою

Кумулятивне ядро, як і кумулятивний струмінь, діє незалежно від заряду [4], оскільки відривається від його корпусу під час вибуху [4]. Зіткнувшись з вибоєм, КВЯ передає імпульс ГП, поверхня якої руйнується. Далі КВЯ “розтікається” в сторони – поводить себе, як рідина [4]. “Розтікання” підтверджено відеозйомкою зіткнення свинцево-мідної кулі діаметром 7 мм з бетонною перешкодою на швидкості 603 м/с [20, 21] (рис. 1).

Розтікання решток КВЯ також підтверджується появою сколів та мікротріщин на поверхні граніту навколо епіцентра вибуху (рис. 2). Встановлені тріщини мають ширину розкриття 1,1–4,7 мкм. Рештки КВЯ видаляються під впливом стисненого повітря разом зі шламом.

Результати досліджень підтверджують появу сколів і тріщин по периметру області руйнування ріжучого інструмента комбінованої дії діаметром 36 мм (див. рис. 2).



Рис. 1. Зіткнення свинцево-мідної кулі з бетонною перешкодою [20, 21]

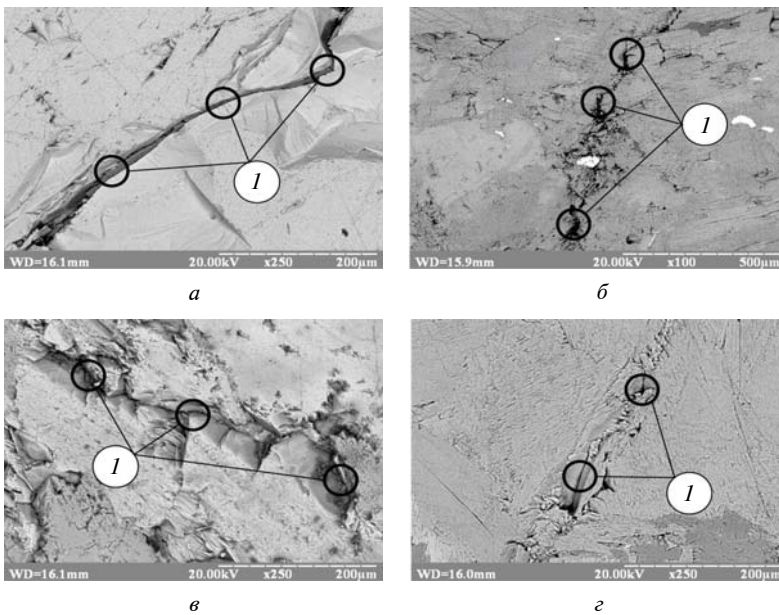


Рис. 2. Мікроскопічна зйомка граніту після навантажень кумулятивним вибуховим ядром: а – в епіцентрі вибуху; б – 5 мм від епіцентра вибуху; в – 10 мм від епіцентра вибуху; г – 20 мм від епіцентра вибуху (1 – мікротріщини)

## Висновки

1. Кумулятивне вибухове ядро виконує функцію динамічного індентора, спрямованого на ви-

бій, тому його параметри (швидкість 3662 м/с, тиск 550 МПа) не впливають на віддачу установки.

2. Кумулятивне вибухове ядро збільшує навантаження на вибій зі 139,27 МПа (тиск продуктів детонації всередині ріжучого інструмента) до 550 МПа (тиск кумулятивного вибухового ядра під час зіткнення з вибоєм).

3. Віддача установки внаслідок детонації заряду вибухової речовини (суміш  $\text{KCIO}_4$  та  $\text{Mg}$ ) з параметрами – швидкість детонації 2100 м/с, швидкість розльоту продуктів детонації 2493 м/с, тиск 293 МПа/кг – відсутня, оскільки, за рівнянням І.В. Мещерського, прискорення віддачі рівне  $0,0002 \text{ м/с}^2$ , а її швидкість за законом збереження імпульсу –  $0,02 \text{ Дж}$ .

4. Кумулятивне вибухове ядро після зіткнення з вибоєм “розтікається” в сторони, чим додатково формує сколи та мікротріщини в радіусі 20 мм від епіцентру вибуху.

Отримані результати будуть використані для подальших досліджень імпульсного навантаження гірських порід.

## Список літератури

1. Дерев'янюк О.В. Аналіз якості та технологій видобування відкритим способом природного каменю з родовищ Житомирської області // Вісник ЖДТУ. – 2008. – № 4 (47). – С. 201–205.
2. Тангаев І.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
3. Степин П.А. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
4. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. – 800 с.
5. Бойко В.В., Кузьменко А.А., Хлевнюк Т.В. Оценка сейсмобезопасности сооружений при воздействии на них взрывных волн с учетом их спектральных характеристик // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Гірництво. – 2008. – № 16. – С. 3–13.
6. Закономерности деформаций грунтов и горных пород при динамических воздействиях / А.А. Вовк, В.Г. Барановский, В.Г. Кравець, Б. Кужея. – К.: Ин-т гидромеханики НАНУ, 1996. – 170 с.
7. Спосіб руйнування скельних порід та пристрій для його здійснення: Патент 58301 Україна: МПК 7E21C37/18 / В.Г. Кравець, В.І. Плужник, О.С. Жмуденко, С.Л. Калюжний; заявник та патентовласник В.Г. Кравець. – № 2002119322; Заявлено 22.11.2002; Опубл. 15.07.2003, Бюл. № 7. – 3 с.
8. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
9. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара. – М.: Физматлит, 2006. – 304 с.
10. Станюкович К.П., Орленко Л.П. Основы теории действия взрыва. – М.: ВИА, 1964. – 163 с.

11. *Фортвов В. Е.* Мощные ударные волны и экстремальное состояние вещества // Успехи физ. наук. – 2007. – 177, № 4. – С. 347–368.
12. *Спосіб комбінованого руйнування гірських порід:* Патент 107732 Україна: МПК E21B 7/00 / О.М. Терентьев, В.Г. Кравець, П.А. Гонтарь; заявник та патентовласник НТУУ “КПІ”, Київ. – Заявлено 13.05.2013; Опубл. 10.02.2015, Бюл. № 22. – 5 с.
13. *Кравець В.Г., Прокопенко В.С., Фролов О.О.* Вибухові роботи. Фізичні параметри вибуху, елементи технологій, охорона праці. – К.: ВПК “Політехніка”, 2005. – 72 с.
14. *Никольский Б.П.* Справочник химика. Т. 1. – М.: Химия, 1966. – 1072 с.
15. *Глушко В.П.* Термические константы веществ. Вып. 8. – М.: ВИНТИ, 1978. – 535 с.
16. *Plane J.M.C.* Magnesium Chemistry in the Upper Atmosphere. – Leeds: University of Leeds, 2010. – 20 p.
17. *Гемпел К.А.* Справочник по редким металлам. – М.: Мир, 1965. – 946 с.
18. *Washburn E.W.* International Critical Tables of Numerical Data Physics, Chemistry and Technology. – New York: McGraw-hill Book Company, 1928. – 481 p.
19. *Кильчевский Н.А.* Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1977. – Т. 1. Кинематика, статика, динамика точки. – 479 с.
20. *Иродов И.Е.* Основные законы механики. – М.: Высшая школа, 1985. – 248 с.
21. *Зайцев А.К.* Основы учения о трении, износе и смазке машин. – М.: Mashgiz, 1947. – Ч. 1. Трение в машинах. Теория, расчет и конструкция подшипников и подпятников скольжения. – 256 с.
22. *Mehl W.* 1 million fps Slow Motion video of bullet impacts [Online]. – Available: <https://www.youtube.com/watch?v=QfDoQwIAaXg>
23. *Mehl W.* Professional measurement equipment Made in Germany [Online]. – Available: <http://www.kurzzeit.com/en/index.html>

## References

1. O.V. Derevyanko, “The analysis of quality and technologies of open cast mining in Zhytomyr region”, *Visnyk ZhDTU*, no. 4 (47), pp. 201–205, 2008 (in Ukrainian).
2. I.A. Tanhaiev, *Energy Consumption of Useful Minerals Extraction and Processing Processes*. Moscow, USSR: Nedra, 1986 (in Russian).
3. P.A. Stepyin, *Strength of Materials*. Moscow, USSR: Vysshaya Shkola, 1988 (in Russian).
4. F.A. Baum *et al.*, *Physics of an Explosion*. Moscow, USSR: Gosudarstvennoe Izdatelstvo Fiziko-Matematicheskoy Literatury, 1959 (in Russian).
5. V.V. Boyko *et al.*, “Evaluation structures’ seismic-safety under the influence of explosive waves based on its spectral characteristics”, *Visnyk NTUU “KPI”. Ser. Hirnytsvo*, no. 16, pp. 3–13, 2008 (in Russian).
6. A.A. Vovk *et al.*, *The Patterns of the Soil and Rocks Deformation under Dynamic Loads*. Kyiv, Ukraine: Institute of Hydromechanics of NASU, 1996 (in Russian).
7. V.H. Kravets *et al.*, “Method for rock destruction and appliance for its implementation”, UA Patent 58301, Jul. 15, 2003.
8. M.A. Lavrentev and B.V. Shabat, *Hydrodynamics Problems and their Mathematical Models*. Moscow, USSR: Nauka, 1973 (in Russian).
9. L.P. Orlenko, *Physics of the Explosion and Shock*. Moscow, USSR: Fizmatlit, 2006 (in Russian).
10. K.P. Stanyukovich and L.P. Orliencko, *Basics of Theory of Explosion Act*. Moscow, USSR: VIA, 1964 (in Russian).
11. V.E. Fortov, “High-pressure shock waves and extreme states of matter”, *Uspehi Fizicheskikh Nauk*, no. 4, pp. 347–368, 2007 (in Russian).
12. O.M. Terentiev *et al.*, “Combined method of rocks destruction”, UA Patent 107732, Feb. 10, 2015.
13. V.H. Kravets *et al.*, *Explosive Works. Physical parameters of Explosion, Theory Elements, Occupational Safety*. Kyiv, Ukraine: VPK “Polytechnika”, 2005 (in Ukrainian).
14. B.P. Nykolskyi, *Chemical Handbook*, vol. 1. Moscow, USSR: Khymia, 1966 (in Russian).
15. V.P. Hlushko, *Thermal Constants and Substances*, vol. 8. Moscow, USSR: VINITI, 1978 (in Russian).
16. J.M.C Plane, *Magnesium Chemistry in the Upper Atmosphere*. Leeds, UK: University of Leeds, 2010.
17. C.A. Hempel, *Rare Metal Handbook*. Moscow, USSR: Mir, 1965 (in Russian).
18. E.W. Washburn, *International Critical Tables of Numerical Data Physics, Chemistry and Technology*. New York, USA: McGraw-hill Book Company, 1928.
19. N.A. Kilchevskii, *Course on Theoretical Mechanics*, vol. 1, *Kinematics, Statics, and Dynamics of a Mass Point*. Moscow, USSR: Nauka, 1977 (in Russian).
20. I.E. Irodov, *Fundamental Laws of Mechanics*. Moscow, USSR: Vysshaya Shkola, 1985 (in Russian).
21. A.K. Zaytsev, *Fundamentals of Friction Teachings, Wear and Lubrication of Machines*, vol. 1, *Friction in Machines. Theory, Calculation and Design of Bearings and Thrust Bearings Slip*. Moscow, USSR: Mashgiz, 1947 (in Russian).

22. W. Mehl. 1 million fps Slow Motion video of bullet impacts [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=QfDoQwIAaXg>
23. W. Mehl. Professional measurement equipment Made in Germany [Online]. Available: <http://www.kurzzeit.com/en/index.html>

О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь

#### ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ КУМУЛЯТИВНОГО ВИБУХОВОГО ЯДРА ПІД ЧАС ВИБУХО-МЕХАНІЧНОГО БУРІННЯ

**Проблематика.** Сучасні способи руйнування витрачають до 90 % енергії на підготовку гірських порід до виймання. Питома енергоємність при цьому сягає 120 кВт·год/м<sup>3</sup>. Наше дослідження пропонує нове енергозберігаюче руйнування гірських порід комбінованими вибухо-механічними навантаженнями.

**Мета досліджень.** Доведення відсутності віддачі установки вибухо-механічної дії під час детонації зарядів вибухової речовини.

**Методика реалізації.** Визначення чинника, що викликає віддачу установки під час вибуху; вивчення поведінки кумулятивного вибухового ядра під час зіткнення з вибоєм; вивчення прискорення швидкості та енергії віддачі.

**Результати досліджень.** Доведено, що кумулятивне вибухове ядро виконує функцію динамічного індентора, спрямованого на вибій. Після зіткнення з вибоєм "розтікається" в сторони, чим формує сколи та мікротріщини в радіусі 20 мм від епіцентра вибуху.

**Висновки.** Отримані параметри віддачі установки (прискорення 0,0002 м/с<sup>2</sup>; енергія 0,02 Дж) доводять відсутність її горизонтальних і вертикальних переміщень під час вибухо-механічного руйнування гірських порід.

**Ключові слова:** руйнування гірських порід; вибухо-механічне буріння; енергозбереження; комбіноване навантаження; кумулятивне вибухове ядро.

О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь

#### ЕНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КУМУЛЯТИВНОГО ВЗРЫВНОГО ЯДРА ВО ВРЕМЯ ВЗРЫВО-МЕХАНИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ

**Проблематика.** Современные способы разрушения тратят до 90 % энергии на подготовку горных пород к извлечению. Удельная энергоёмкость при этом достигает 120 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Данное исследование предлагает новое энергосберегающее разрушение горных пород комбинированными взрыво-механическими нагрузками.

**Цель исследований.** Доказательство отсутствия отдачи установки взрыво-механического действия во время детонации зарядов взрывчатого вещества.

**Методика реализации.** Определение фактора, который вызывает отдачу установки во время взрыва; изучение поведения кумулятивного взрывного ядра во время столкновения с забоем; изучение ускорения, скорости и энергии отдачи.

**Результаты исследований.** Доказано, что кумулятивное взрывное ядро выполняет функцию динамического индентора, направленного на забой. После столкновения с забоем "растекается" в стороны, чем формирует сколы и микротрещины в радиусе 20 мм от эпицентра взрыва.

**Выводы.** Полученные параметры отдачи установки (ускорение 0,0002 м/с<sup>2</sup>; энергия 0,02 Дж) доказывают отсутствие ее горизонтальных и вертикальных перемещений во время взрыво-механического разрушения горных пород.

**Ключевые слова:** разрушение горных пород; взрыво-механическое бурение; энергосбережение; комбинированная нагрузка; кумулятивное взрывное ядро.

Рекомендована Радою  
Інституту енергозбереження  
та енергоменеджменту  
НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського"

Надійшла до редакції  
03 червня 2016 року