

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.236.9
DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.103373

О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь*
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД КОМБІНОВАНИМ ВИБУХО-МЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Background. Rock drilling is characterized by an energy capacity of more than 120 kWh/m³. This is due to the fact that about 90 % of the energy is expended on the “preparation” of rocks for destruction. This study proposes to combine explosive and mechanical loads to reduce specific energy consumption of rock destruction.

Objective. The aim of the paper is energy effective technology development for rock destruction by combined explosive-mechanical loads.

Methods. Analytical studies; regression analysis; math modeling; experimental research; technical and economic analysis.

Results. Specific energy decreasing for explosive-mechanical rock drilling by 4–16 % was experimentally proved.

Conclusions. As a result of the implementation of explosive-mechanical rock drilling on the created full-sized experimental device, the efficiency coefficient increased from 77 to 80 %.

Keywords: rock drilling; explosive-mechanical drilling; energy efficiency; combined load; recoil.

Вступ

Сумарні запаси природного декоративного каменю в Україні становлять понад 500 млн м³ [1]. Розвідані запаси на 74 % (118 млн м³) [1] складаються з граніту, габро, лабрадориту – скельних гірських порід (ГП). Енергоємність буріння шпурів у цих ГП становить понад 120 кВт·год/м³ [2]. Це зумовлено тим, що близько 90 % [3] енергії витрачається на “підготовку” ГП до руйнування.

Перспективними способами руйнування ГП є способи з комбінацією видів навантаження вибоїв [4–7]. Їх впровадження дає змогу знижувати енергоємність руйнування. Вплив декількох видів енергії на ГП сприяє формуванню внесеної технологічної тріщинуватості, додатково до існуючої природної. Це знижує опір руйнуванню, міцнісні властивості ГП і витрати енергії на руйнування ГП [8]. Важливою стає керованість енергетичними показниками комбінованого вибухо-механічного навантаження вибою. Зниження енергоємності вибухо-механічного руйнування ГП за рахунок спрямування енергії вибуху перпендикулярно до вибою є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз фундаментальних праць із теорії вибухового руйнування ГП [9–13] сприяв розробці нами вибухо-механічного способу руйнування ГП. Було запропоновано нову класифікацію комбінованих навантажень на вибій із застосуванням теорії графів. Вибрано орієнтований 12-вершинний граф із нестрого паралельними дугами. Він

дав змогу систематизувати понад 100 комбінацій способів руйнування ГП. Аналіз проведено за такими трьома показниками: енергоємність руйнування, швидкість руйнування, область застосування за коефіцієнтом міцності проф. Протодьяконова. Встановлено, що вказані вище параметри для вибухового способу відповідно рівні 136–140 кВт·год/м³, 10–15 м/год, 1–20 в.о., а для механічного – 13–950 кВт·год/м³, 0,1–75 м/год, 1–20 в.о. Для зниження енергоємності вибухо-механічного руйнування ГП механічне навантаження вибою доповнено вибуховим.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка енергоефективної технології руйнування ГП комбінованими вибухо-механічними навантаженнями.

Для досягнення поставленої мети поставлені такі задачі: обґрунтувати енергоефективний комбінований спосіб руйнування ГП із використанням кумулятивного вибухового ядра (КВЯ); математично змодельовати енергоємність руйнування ГП в умовах вибухо-механічних навантажень; експериментально дослідити вплив частоти навантажень вибою КВЯ і температури вибуху на питому енергоємність вибухо-механічного руйнування ГП.

Методи дослідження

При виконанні роботи були використані такі методи: *аналітичний* – для встановлення законо-

* corresponding author: gontar.co@gmail.com

мірностей руйнування ГП вибухо-механічними навантаженнями при створенні внесеної технологічної тріщинуватості, додатково до природної; *регресійного аналізу* – для статистичного дослідження залежності енергоємності руйнування ГП від частоти навантажень вибою КВЯ і температури вибуху; *математичного моделювання* – для створення математичної моделі енергоємності руйнування ГП вибухо-механічним способом; *експериментальний* – для отримання залежностей енергоємності руйнування від частоти навантажень вибою КВЯ і температури вибуху; *техніко-економічного аналізу* отриманих результатів.

Результати досліджень

Проведено комплексну методику та планування експериментальних досліджень вибухо-механічного руйнування ГП. Як цільові функції вибрано залежності енергоємності руйнування ГП від частоти навантажень вибою КВЯ і температури вибуху; як параметр оптимізації – питому енергоємність руйнування ГП. Задачею оптимізації є зниження енергоємності руйнування ГП. Як чинники, що впливають на енергоємність вибухо-механічного руйнування ГП, вибрано їх границю міцності на стиснення, температуру вибуху та частоту навантажень вибою КВЯ. Оскільки вибрані чинники варіюють на трьох рівнях, було застосовано ортогональний центральний композиційний план, який описує поверхні 2-го порядку. Ядром плану експерименту вибрано повний чинниковий експеримент типу 2^k . Складено матрицю планування, що передбачає проведення 60 дослідів з урахуванням повторних чотирьох за Стюдентом.

Розроблено конструктивне виконання механізму для вибухо-механічного руйнування ГП (рис. 1), а саме вертлюгу модифікованого та різального інструмента.

У результаті взведення затвору 7 заряд вибухової речовини (ВР) 4 надходить із касети 6 через отвір 8 до продувного каналу 10. Під дією тиску стисненого повітря, що нагнітається через отвори 9, заряд ВР 4 поступає до різального інструмента 2, куди підведені контактні пластини 3. На контактні пластини 3 імпульсно подається напруга 220 В. Під час замикання контактних пластин 3 електродним кільцем заряду ВР 4 відбувається детонація. Формується КВЯ, що діє безпосередньо на вибій, формуючи внесену технологічну тріщинуватість, додатково до існуючої природної. Комплексна тріщинуватість зменщує вибій, що знижує питому енергоємність його руйнування різцями 1.

Проведено аналіз критеріїв руйнування з точки зору комбінованого вибухо-механічного навантаження вибою. Виділено кінетичний критерій руйнування [13], оскільки він передбачає температурні коливання міжатомних зв'язків твердого тіла, що послаблюють його при механічному навантаженні. За результатами аналізу розроблено базовий критерій вибухо-механічного руйнування ГП, що поєднує енергію активації руйнування ГП, кінетичну енергію КВЯ, теплову енергію вибуху та енергію механічного руйнування ГП:

$$e = \frac{k \cdot N \cdot t}{V} \cdot \exp\left(\frac{U_0 - U_k - U_T}{U_{\text{Mex}}}\right), \quad (1)$$

де e – енергоємність руйнування ГП, Вт·год/м³; k – емпіричний коефіцієнт у межах математичного моделювання, в.о.; N – потужність електро-

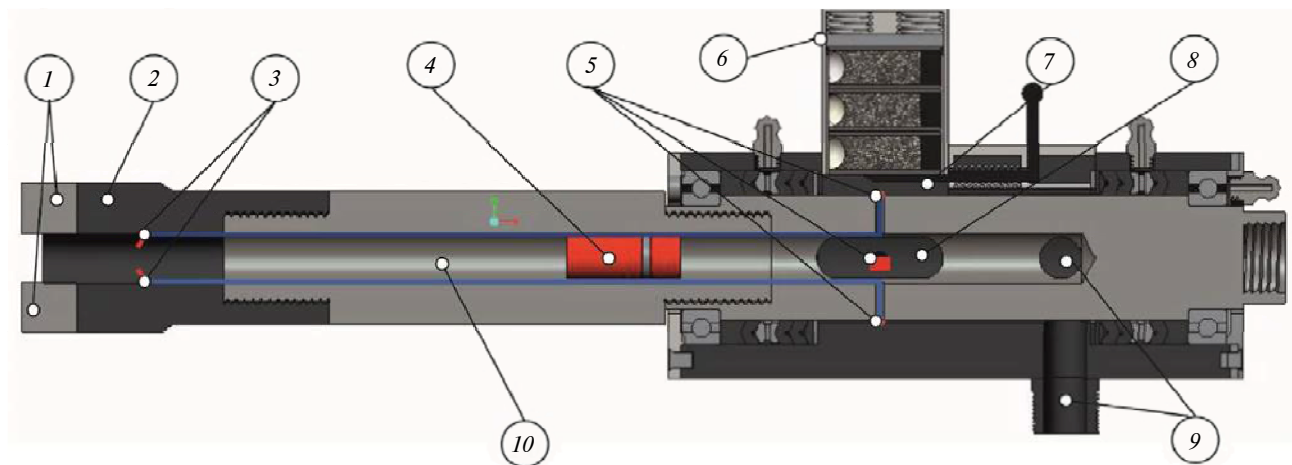


Рис. 1. Конструкція механізму для вибухо-механічного руйнування гірських порід: 1 – різці; 2 – різальний інструмент; 3 – пластини контактні; 4 – заряд вибухової речовини; 5 – напайки контактні; 6 – касета із зарядами вибухової речовини; 7 – затвор; 8 – отвір для подачі зарядів вибухової речовини до продувного каналу; 9 – отвори для нагнітання стисненого повітря; 10 – продувний канал

приводу експериментального пристрою, Вт; t – час руйнування ГП, год; V – об’єм ГП, м³; U_0 – енергія активації руйнування ГП, Дж; U_k – кінетична енергія КВЯ, Дж; U_t – теплова енергія вибуху, Дж; $U_{\text{мех}}$ – енергія механічного руйнування ГП, Дж.

Для врахування параметрів вибухо-механічного навантаження вибою базовий критерій доповнено:

– **енергією активації руйнування ГП**, виведеною на основі питомої масової енергії кристалічних решіток [14]:

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot U_i) \cdot \rho \cdot V \cdot \eta_0}{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot M_i)}, \quad (2)$$

де n_i – частка мінералів у складі ГП, в.о.; U_i – енергія кристалічних решіток мінералів ГП, Дж/моль; ρ – щільність ГП, кг/м³; η_0 – коефіцієнт природної тріщинуватості, в.о.; M_i – молярна маса мінералів ГП, кг/моль;

– **кінетичною енергією КВЯ**, що модифікована з критерію швидкості проникнення кумулятивного струменя в перешкоду і досліджена Ф.А. Баумом [9]:

$$U_k = \frac{m_0 \cdot a \cdot p_k \cdot u_0^2}{\sigma_{\text{ст}} \cdot [1 + (\alpha_1 \cdot \rho) / (\alpha_2 \cdot \rho_1)]^2}, \quad (3)$$

де m_0 – маса облицювання заряду ВР, кг; a – коефіцієнт використання вибуху, еквівалентний частоті навантажень КВЯ, в.о.; p_k – тиск КВЯ, Па; u_0 – швидкість КВЯ, км/с; $\sigma_{\text{ст}}$ – границя міцності на стиснення ГП, Па; α_1 – стисливість КВЯ, Па⁻¹; α_2 – стисливість ГП, Па⁻¹; ρ_1 – щільність КВЯ, кг/м³;

– **тепловою енергією вибуху**, на основі теорії академіка Я.Б. Зельдовича [15]:

$$U_t = a \cdot \sum_{k=1}^n i_k \cdot k \cdot T_{\text{виб}} \cdot N_A \cdot \frac{m_{\text{ВР}}}{M_{\text{ВР}}}, \quad (4)$$

де i_k – ступені свободи продуктів детонації, в.о.; k – стала Больцмана, Дж/К; N_A – число Авогадро, моль⁻¹; $m_{\text{ВР}}$ – маса ВР, кг; $M_{\text{ВР}}$ – молярна маса ВР, кг/моль; $T_{\text{виб}}$ – температура вибуху, К;

– **енергією механічного руйнування ГП**:

$$U_{\text{мех}} = \pi \cdot \beta \cdot p \cdot \omega \cdot D \cdot t, \quad (5)$$

де β – коефіцієнт тертя різців об ГП, в.о.; p – зусилля подачі різального інструмента, Н; ω – ку-

това швидкість різального інструмента, рад/с; D – діаметр різального інструмента, м.

Доповнивши базовий критерій (1) критеріями (2)–(5), ми отримали математичну модель вибухо-механічного руйнування ГП:

$$e = \frac{k \cdot N \cdot t}{V} \cdot \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot U_i) \cdot \rho \cdot V \cdot \eta_0}{\sum_{i=1}^n (n_i \cdot M_i)} - \frac{m_{\text{яд}} \cdot a \cdot p_{\text{уд}} \cdot u_0^2}{\sigma_{\text{ст}} \cdot [1 + (\alpha_1 \cdot \rho) / (\alpha_2 \cdot \rho_1)]^2} - a \cdot \sum_{k=1}^n i_k \cdot k \cdot T_{\text{виб}} \cdot N_A \cdot \frac{m_{\text{ВР}}}{M_{\text{ВР}}} \right\} \cdot (\pi \cdot \beta \cdot p \cdot \omega \cdot D \cdot t)^{-1}.$$

Математична модель енергоємності руйнування ГП відрізняється від відомих тим, що враховує параметри вибухо-механічного навантаження вибою, сукупність дії його природної та внесеної технологічної тріщинуватостей. Із розробленої математичної моделі отримано аналітичні залежності енергоємності руйнування ГП від частоти навантажень вибою КВЯ і температури вибуху. Енергоємність знизилась з 296 до 273 кВт·год/м³, або на 9 %, для габро; з 250 до 228 кВт·год/м³, або на 8 %, для граніту; з 211 до 191 кВт·год/м³, або на 10 %, для пісковіку.

Для експериментальної апробації вибухо-механічного руйнування ГП виготовлено заряди ВР (рис. 2). Вибрано вибухові суміші Mg + КСіО₄ та Al + КСіО₄. Маса ВР становить 0,5 г, щільність заряджання – 500 кг/м³. Матеріалом облицювання $\bar{3}$ є алюміній, оскільки на 20 % [9] збільшує швидкість КВЯ, ніж при використанні міді. Облицювання $\bar{3}$ виготовлено у формі напівсфери, що кумулює вибухове ядро в напрямку вибою. Ударний ефект КВЯ на 15 % [9] стійкіший, ніж ефект кумулятивного струменя під час обертання різального інструмента.

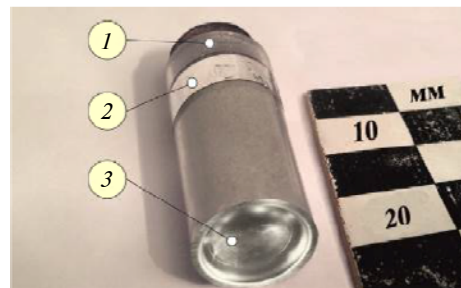


Рис. 2. Заряд вибухової речовини: 1 – корпус; 2 – електродне кільце; 3 – напівсферичне облицювання

Для встановлення необхідної та достатньої частоти навантажень вибою КВЯ проведено оцінку пружних властивостей ГП. Отримано поліноміальні залежності зміни швидкості поширення ультразвукових хвиль у зразках ГП та модуля пружності I роду від частоти їх навантажень КВЯ (рис. 3). Вимірювання швидкості ультразвукових хвиль проведено на базі установки для ультразвукової дефектоскопії УИСУ-01. Під час вимірювань зафіксовано зниження амплітуди ультразвукових сигналів з 14,0 до 8,0 дБ зі збільшенням частоти навантажень КВЯ від 0 до 0,4 Гц. Встановлено, що коефіцієнт загасання сигналу від 0,6 до 1,0 в.о. свідчить про вертикальну орієнтацію тріщин із кутом від 50° до 90° [16].

Залежності швидкості ультразвукових хвиль від частоти навантажень вибою КВЯ мають ознаки поліноміального спаду з трьома характерними ділянками (див. рис. 3, а). Перша ділянка (від 0 до 4 виб/хв) характеризується експоненціальним спадом кривої зі зниженням швидкості ультразвукових хвиль на ≈ 100 м/с для всіх зразків ГП. Це викликано руйнуванням поверхні зразків ГП із формуванням сколів та мікротріщин. Пластичні властивості окремих мінералів не встига-

ють реалізуватися завдяки близькості до епіцентру вибуху. Пластичні деформації перетворюються на квазіпластичні та крихкі під впливом навантаження КВЯ. Унаслідок вибуху відколюються зерна окремих мінералів ГП. Тангенс кута спаду для зразків габро та граніту $\text{tg}(20^\circ) = 0,36$ майже в 2 рази менший, ніж у пісковикі: $\text{tg}(40^\circ) = 0,84$. Це пояснюється переважанням пластичних властивостей пісковіку порівняно з габро та гранітом завдяки глинистому середовищу. Під час руйнування поверхневих шарів у зразках ГП під внесеною технологічною тріщинуватістю формується область ущільнення 2 (див. рис. 3, б). Про це свідчить друга ділянка (4–12 виб/хв). Так, для зразків габро та граніту продовжується спад, але більш пологий з тангенсом кута $\text{tg}(85^\circ) = 11,43$. Ущільнення пояснюється наявністю пластичних мінералів у складі ГП: габро – плагіоклаз; граніт – мікроклін. Глинисто-слюдисте середовище та пористість 2,9–3,1 % пісковіку сприяли його ущільненню, що відображається зростанням функції з тангенсом кута $\text{tg}(73^\circ) = 3,27$. Зі стисненням лаборатору та мікрокліну їх напружений стан зростає, і при досягненні границі міцності на стиснення вони руйнуються. Коефіцієнт тріщину-

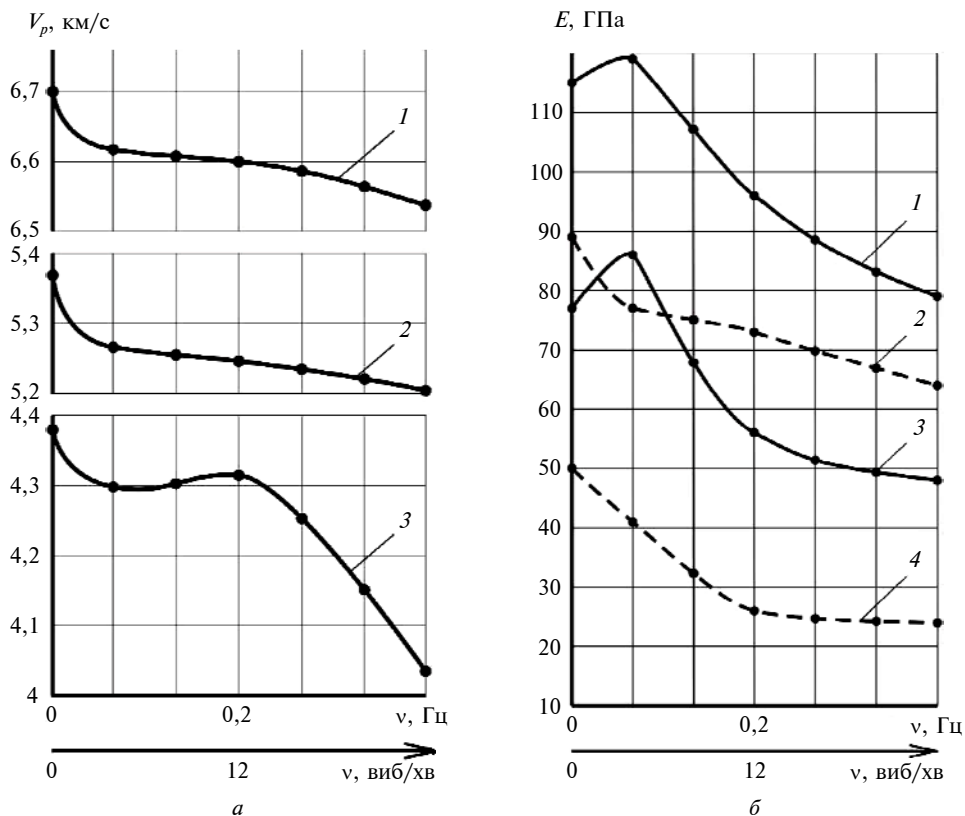


Рис. 3. Залежність від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром швидкості поширення ультразвукових хвиль у зразках гірських порід (а): 1 – габро; 2 – граніт; 3 – пісковик; та модуля пружності I роду (б): 1 – габро; 2 – мікроклін; 3 – пісковик; 4 – амфібол

ватості збільшується, про що свідчить третя ділянка (12–24 виб/хв), де відбувається спад функції. Для габро та граніту тангенси кутів спаду рівні $\text{tg}(76^\circ) = 4,00$ і $\text{tg}(84^\circ) = 6,31$. Третя ділянка для пісковика відзначається спадом функції з $\text{tg}(37^\circ) = 0,75$, що викликано руйнуванням основного мінералу глинистого середовища пісковика – каолініту.

Вимірювання зміни модуля пружності I роду від частоти навантажень вибою КВЯ проведено за допомогою мікротвердоміра “Мікрон-альфа”. Залежність модуля пружності I роду від частоти навантажень КВЯ для габро та пісковика також має 3 характерні ділянки (див. рис. 3, б). Перша ділянка (0–4 виб/хв) для габро та пісковика відзначається зростанням модуля пружності I роду внаслідок ущільнення пластичних мінералів та закриттям мікротріщин. Ущільнення ГП призводить до збільшення їх теплопровідності та поглиблює область пластичної деформації. Тому перші ділянки габро та пісковика (0–4 виб/хв) мають тангенс кута зростання, рівний відповідно $\text{tg}(21^\circ) = 0,38$ і $\text{tg}(41^\circ) = 0,86$. Близька до епіцентру вибуху поверхня ГП не встигає пластично деформуватись. Відколюються мінерали, формуючи впадини, між якими розвиваються мікротріщини. Тому модуль пружності I роду для габро та пісковика на другій ділянці (4–12 виб/хв) знижується з тангенсом кута спаду $\text{tg}(49^\circ) = 1,15$ і $\text{tg}(57^\circ) = 1,54$ відповідно. На третій ділянці (12–24 виб/хв) інтенсивність зменшення модуля пружності I роду для пісковика зменшується до тангенсу кута $\text{tg}(15^\circ) = 0,26$. Це пов'язано зі спікливістю ущільненого глинистого середовища під дією температури продуктів детонації. На третій ділянці для габро (12–24 виб/хв) тангенс кута спаду також зменшився до $\text{tg}(29^\circ) = 0,55$ унаслідок пластичного ущільнення плагіоклазу.

Оскільки зерна граніту мають розмір 2–5 мм, а площа вдавлення індентора мікротвердоміра становить близько 50 мкм, вимірювання проведено для основних мінералів граніту – мікрокліну 2 й амфіболу 4 (див. рис. 3, б). Частка мікрокліну становить 40 % у структурі граніту, тому відображає міцність зразка граніту в цілому. Перші ділянки для мінералів (0–4 виб/хв) відображають крихке руйнування внаслідок близькості до епіцентру вибуху з тангенсом кута спаду $\text{tg}(52^\circ) = 1,28$ і $\text{tg}(38^\circ) = 0,78$. Стрічкоподібні кристали амфіболу відколюються під дією навантажень КВЯ. Тому крихке руйнування першої ділянки для амфіболу продовжується до 12 виб/хв. Зі збільшенням частоти навантажень вибою КВЯ приповерхневий

шар ущільнюється, що приводить до зростання його теплопровідності. Тому на другій ділянці (12–24 виб/хв) проявляються пластичні властивості як мікрокліну, так і амфіболу, а тангенс кута спаду зменшується до $\text{tg}(14^\circ) = 0,25$ і $\text{tg}(4^\circ) = 0,07$ відповідно. З аналізу отриманих залежностей встановлено необхідну та достатню частоту навантажень вибою КВЯ (12–24 виб/хв) для зниження енергоємності вибухо-механічного руйнування ГП.

Побудовано зображення рельєфу поверхні зразків ГП до та після навантажень КВЯ (рис. 4–6) за допомогою оптичного нанопрофілометра “Мікрон-гамма”.

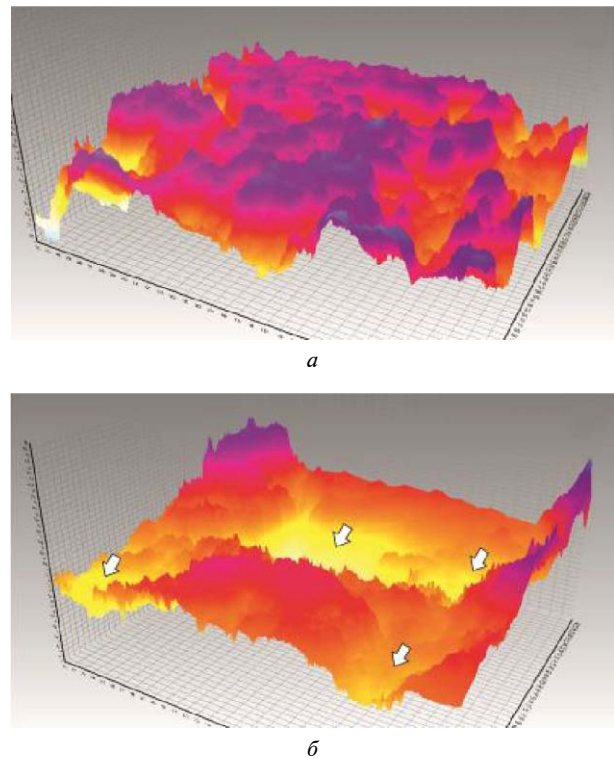


Рис. 4. Мікротопографія поверхні габро: *a* – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; *б* – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром

Зразки габро до навантажень КВЯ мають нерівність поверхні з наявністю кратерів (рис. 4, *a*). Кількість кратерів становить 5, що займають 28 % від досліджуваної площі $3 \cdot 10^4$ мкм² глибиною 3–9 мкм (рис. 4, *a*). У результаті навантаження КВЯ кратери на поверхні габро поглибились до 6–14 мкм і розширились до 45 % від досліджуваної площі $3 \cdot 10^4$ мкм² (рис. 4, *б*).

Поверхня зразків граніту до навантажень КВЯ відносно гладка з наявністю кратерів у кількості 8 (рис. 5, *a*).

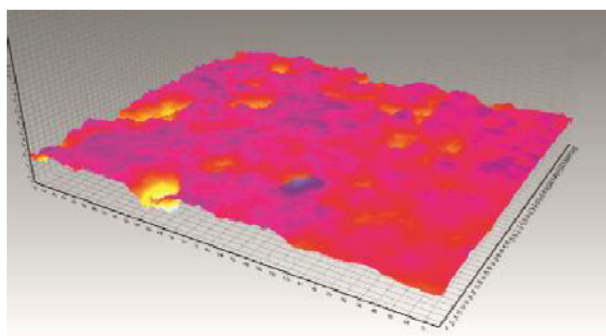
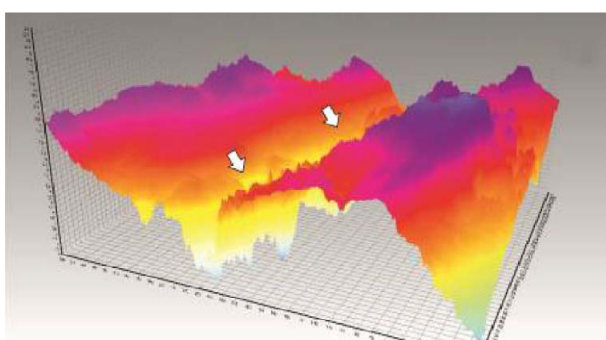
*a**б*

Рис. 5. Мікротопографія поверхні граніту: *a* – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; *б* – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром

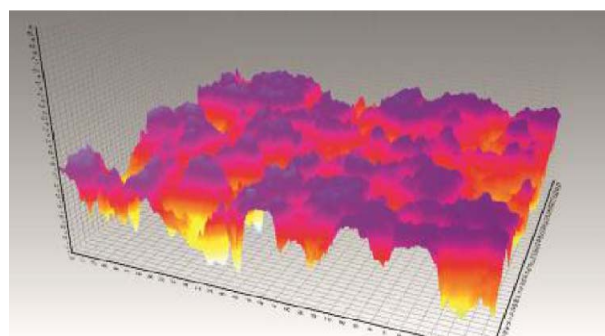
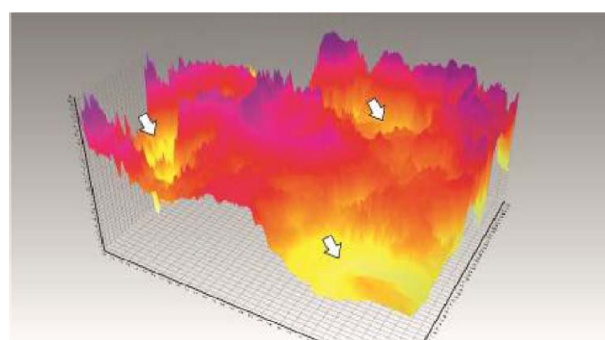
*a**б*

Рис. 6. Мікротопографія поверхні піщовику: *a* – до навантаження кумулятивним вибуховим ядром; *б* – після навантаження кумулятивним вибуховим ядром

Кратери займають 24 % від досліджуваної площі $3 \cdot 10^4$ мкм², глибина яких становить 1–3 мкм. Характерне утворення ущелини на поверхні граніту, що перетинає досліджувану площу та має глибину 3–14 мкм. Поява ущелини пояснюється розривом зв'язків між стрічкоподібними кристалами рогової обманки (рис. 5, *б*). Додатково утворився один кратер глибиною 12 мкм, що разом з ущелиною займає площу 40 % від досліджуваної.

Зразок піщовику до навантажень має 7 кратерів глибиною 2–8 мкм (рис. 6, *a*).

Кратери займають 53 % від досліджуваної площі $3 \cdot 10^4$ мкм². Під дією КВЯ піщинки кварцу відколюються, розширюючи кратери до 65 % від загальної площі. Глибина збільшилась до 5–18 мкм, що підтверджує рис. 6, *б*.

Для визначення глибини проникнення внесеної технологічної тріщинуватості внаслідок навантажень КВЯ проведено рентгенографічну зйомку зразків ГП (рис. 7–9). Використано рентгенодефектоскопічний апарат РАП 150/300. Зображення після навантажень КВЯ для зразків габро та граніту різняться появою області затемнення *1* (рис. 7, *б* і 8, *б*).

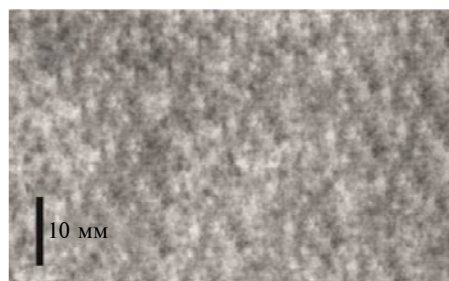
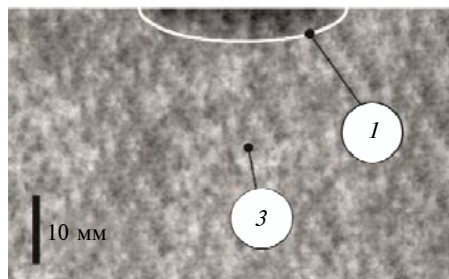
*a**б*

Рис. 7. Рентгенографічне зображення зразка габро: *a* – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; *б* – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром (*1* – область внесеної технологічної тріщинуватості, *3* – область природної тріщинуватості; область ущільнення *2* відсутня)

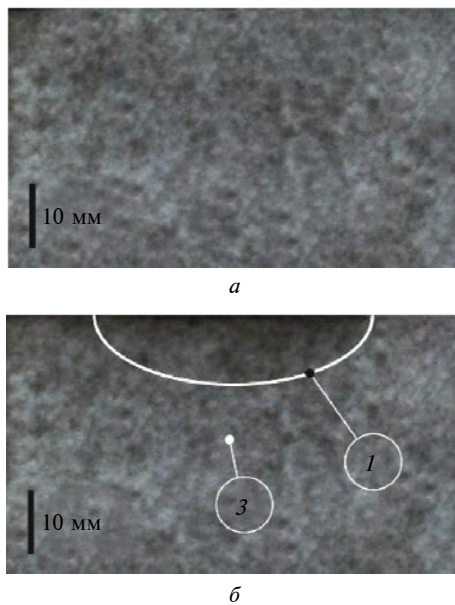


Рис. 8. Рентгенографічне зображення зразка граніту: *a* – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; *б* – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром (*1* – область внесеної тріщинуватості, *3* – область природної тріщинуватості; область ущільнення *2* відсутня)

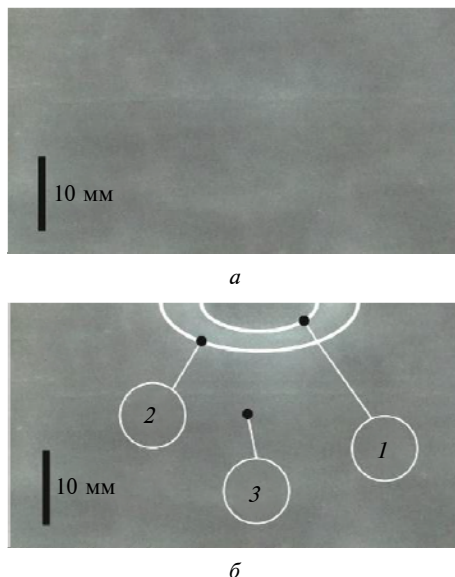


Рис. 9. Рентгенографічне зображення зразка пісковика: *a* – до навантажень кумулятивним вибуховим ядром; *б* – після навантажень кумулятивним вибуховим ядром (*1* – область внесеної тріщинуватості, *2* – область ущільнення “біла тінь”, *3* – область природної тріщинуватості)

Встановлено, що область *1* відображає внесу технологічну тріщинуватість, наповнену повітрям. Глибина області внесеної технологічної тріщинуватості *1* для габро становила 5 мм, ширина – 23 мм (рис. 7, б).

Глибина технологічної тріщинуватості для граніту становила 5–10 мм (рис. 8, б).

Рентгенографічні зображення пісковика свідчать про його ущільнення під дією навантажень, на що вказує “біла тінь” *2* (рис. 9, б). Ущільнення пояснюється наявністю пластичного глинисто-слюдистого цементу в складі пісковика та природної тріщинуватості близько 3,0 %. Верхня частина області ущільнення *2*, поглиблюючись з *1* до *3* мм, темніє, що відображає появу внесеної технологічної тріщинуватості *1* глибиною до 3 мм (рис. 9, б). Глибина внесеної технологічної тріщинуватості для пісковика не перевищує 5 мм.

Для підтвердження глибини проникнення технологічної тріщинуватості проведено капілярну дефектоскопію (використано пенетрант MR68C і проявник MR70) зразка граніту (рис. 10, б).

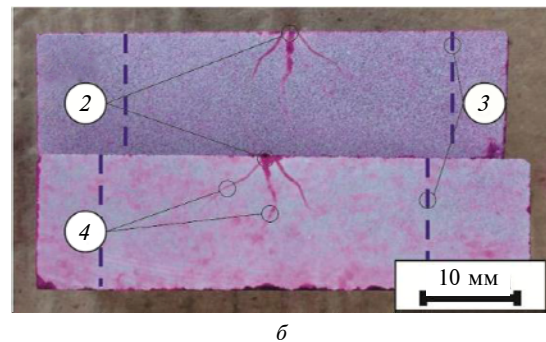
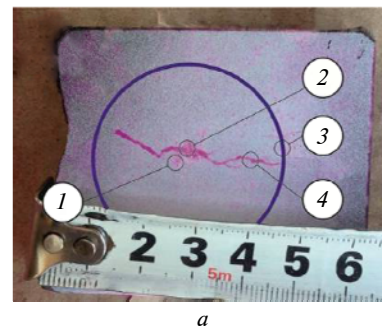


Рис. 10. Результати капілярної дефектоскопії зразка граніту після навантаження кумулятивним вибуховим ядром: *a* – поверхня зразка граніту; *б* – поперечні розрізи зразка граніту в епіцентрі вибуху; *1* – сколи; *2* – епіцентр вибуху; *3* – контур різального інструмента комбінованої дії; *4* – мікротріщини

Дефектоскопія спочатку проведена на поверхні граніту (рис. 10, *a*). Потім зразок розрізано навпіл по лінії епіцентру вибуху для дослідження поперечних перерізів граніту (рис. 10, *б*). Шліфування поверхонь проведено згідно з вимогами капілярної дефектоскопії для чіткого виявлення тріщин. З отриманих результатів встановлено, що під дією КВЯ на поверхні формуються

тріщини (рис. 10). При цьому чітко виражена лише одна тріщина (рис. 10, *a*). Це пояснюється тим, що тріщина має ширину розкриття 30 мкм і глибину 10 мм (рис. 10, *b*). Глибина тріщин 10 мм підтверджується рентгенографічною зйомкою граніту (див. рис. 8, *b*).

Створено експериментальний пристрій (рис. 11), що забезпечив реалізацію вибухо-механічного руйнування ГП. Принцип дії такий. За допомогою магнітного пускача 7 запускається електричний привід 9. Встановлюється кутова швидкість 22 рад/с. Обертанням ручки гвинта моделі вибою 1 до різального інструмента подається платформа зі зразком ГП 3. Зусилля подачі фіксується на рівні 2,4 кН. Після початку руйнування ручка затвору 9 зводиться механічно для подачі заряду ВР до продувального каналу. Під тиском стисненого повітря заряд ВР просувається до різального інструмента 4. Детонація відбувається внаслідок контакту електродного кільця заряду (рис. 11) з електродами в каналі різаль-

ного інструмента. Напряга підводиться електродами 5. При цьому знімаються показники аналізатора електромережі та ватметра для розрахунку енергоємності. Після досягнення необхідної глибини руйнування магнітним пускачем 7 пристрій вимикається. За отриманими показниками потужності, часом руйнування та розмірами сформованого шпура визначається питома енергоємність руйнування.

На експериментальній пристрої досліджено залежності енергоємності руйнування ГП від частоти навантажень вибою КВЯ і температури вибуху (рис. 12).

Залежності мають спадний експоненціальний характер (див. рис. 12). Для пісковикку залежність характеризується квадратичною функцією, що пояснюється його ущільненням за рахунок пластичного глинисто-слюдистого середовища та пористості близько 3,0 %. Ущільнення пісковикку також підтверджено областю 2 на рентгенографічному зображенні (див. рис. 9, *b*).

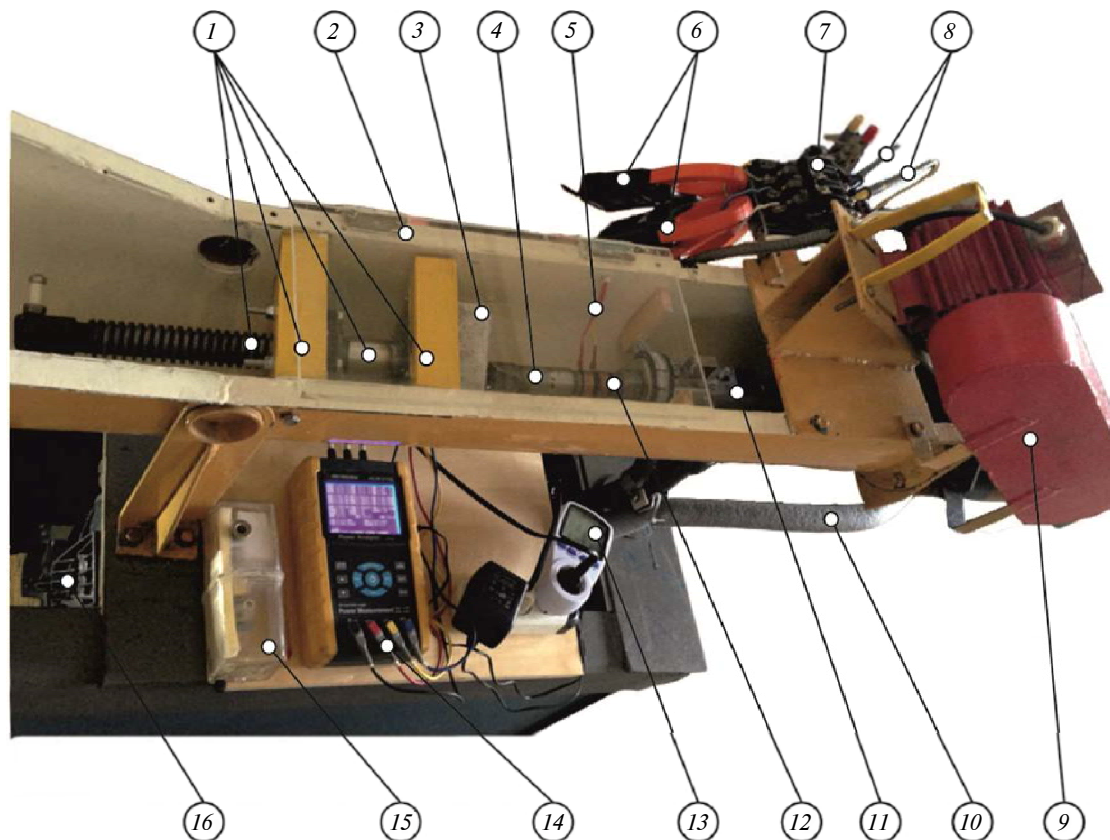


Рис. 11. Експериментальний пристрій: 1 – модель вибою; 2 – захисний екран; 3 – зразок гірської породи; 4 – різальний інструмент; 5 – електроди для подачі напруги 220 В на вибій; 6 – кліщі струмові; 7 – магнітний пускач; 8 – тестові пробники; 9 – електричний привід; 10 – шланг для подачі стисненого повітря в продувний канал; 11 – вертлюг модифікований; 12 – контактні пластини передачі напруги на вибій; 13 – ватметр EU TS-836A, 220 В; 14 – аналізатор електромережі Актаком АСМ 3192; 15 – блок керування компресором; 16 – компресор

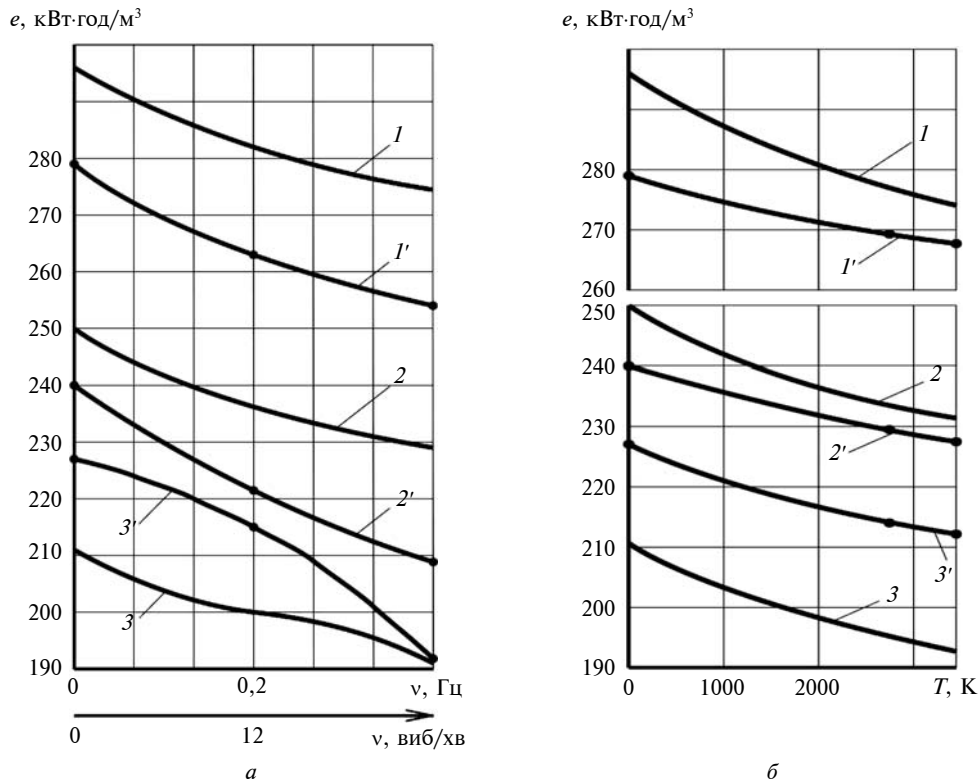


Рис. 12. Залежності енергоємності руйнування гірських порід вибухо-механічними навантаженнями: *a* – від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром; *б* – від температури вибуху (*I* – габро аналітика; *I'* – габро експеримент; *2* – граніт аналітика; *2'* – граніт експеримент; *3* – пісковик аналітика; *3'* – пісковик експеримент)

Висновки

1. Аналітично встановлено та експериментально підтверджено залежність:

– зниження енергоємності руйнування від частоти навантажень вибою кумулятивним вибуховим ядром за поліноміальним законом, а саме: з 279 до 254 кВт·год/м³, або на 9 %, для габро; з 240 до 209 кВт·год/м³, або на 13 %, для граніту; з 227 до 191 кВт·год/м³, або на 16 %, для пісковіку;

– зниження енергоємності руйнування від температури вибуху за експоненціальним законом, а саме: габро на 4 % – з 279 до 267 кВт·год/м³; граніту на 6 % – з 240 до 227 кВт·год/м³; пісковіку на 7 % – з 227 до 211 кВт·год/м³.

2. Досягнуто зниження питомої витрати вибухової речовини з 28,60 до 13,12 кг/м³ за рахунок концентрації кумулятивного вибухового ядра на вибій.

3. Визначено, що за зміною модуля пружності *I* роду раціональне співвідношення вибухових та механічних навантажень становить від-

повідно 31 і 69 % для габро; 28 і 72 % для граніту; 37 і 63 % для пісковіку.

4. Забезпечено зростання швидкості руйнування в лабораторних умовах: на 9 % від 9,23 м/год для габро; на 13 % від 13,95 м/год для граніту; на 14 % від 14,63 м/год для пісковіку.

5. Досягнуто у виробничих умовах зниження енергоємності руйнування граніту вибухо-механічним способом за рахунок доповнення природних тріщин внесеними технологічними кумулятивним вибуховим ядром з 201 до 188 кВт·год/м³.

6. У результаті впровадження вибухо-механічного руйнування ГП на створеному повнорозмірному експериментальному пристрої коефіцієнт корисної дії зріс з 77 до 80 %.

7. Економічний ефект вибухо-механічного руйнування, апробованого у виробничих умовах, становить 25280 грн. Новизна проведених досліджень підтверджена патентом України (№ 107732 UA, E21B 7/00) “Спосіб комбінованого вибухо-механічного руйнування гірських порід”.

8. Отримані результати будуть використані під час створення генератора імпульсних коливань для енергоефективного руйнування структурних елементів гірських порід.

9. Предметом подальших досліджень є енергоефективне руйнування кристалічних решіток ГП електромагнітними коливаннями вибухової хвилі.

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 И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых / И.А. Тангаев. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
3. Степин П.А. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1988. – 367 с.
4. Терентьев О.М., Гонтарь П.А., Шукуров А. Энергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра під час вибухо-механічного буріння // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2016. – № 5. – С. 17–23.
5. Terentiev O., Kleshchov A., Streltsova I. Mechanism of creating the prefracture zone of rock formations with magnetic and hydrocavitation load // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4 (89). – P. 353–355.
6. Терентьев О.М., Стрельцова И.М. Энергоемність та питома поверхнева енергія руйнування гірських порід магнітно-гідрокавітаційним навантаженням // Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Гірництво. – 2015. – Вип. 28. – С. 29–35.
7. Analytical study of rock cutting mechatron vibration system by flat auger tools / S.P. Shevchuk, N.A. Shevchuk, O.O. Vovk, S.V. Zaichenko // Науковий вісник НГУ. – 2016. – № 3. – 29–34.
8. Темченко О.А. Оцінювання ефективності застосування відкритої гірничої технології з позиції енергоемності // Актуальні проблеми економіки. – 2015. – № 9. – 250–257.
9. Физика взрыва / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др.; под ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Физматлит, 2004. – 656 с.
10. Закономерности деформаций грунтов и горных пород при динамических воздействиях / А.А. Вовк, З. Барановский, В.Г. Кравец, Б. Кужея. – К.: Ин-т гидромеханики НАНУ, 1996. – 170 с.
11. Walters W.P., Zukas J.A. Fundamentals of Shaped Charges. – New York: John Wiley&Sons, 1989. – 398 p.
12. Фортвов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальное состояние вещества // Успехи физ. наук. – 2007. – 177, № 4. – С. 347–368.
13. Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород. – М.: Изд-во Москов. горного ун-та, 2004. – 222 с.
14. Чигаров А.В. Кристаллографическая и кристаллохимическая база данных для минералов и структурных аналогов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://database.iem.ac.ru/mincryst>
15. Феоктистов Л.П. Термоядерная детонация // Успехи физ. наук. – 1998. – 168, № 11. – С. 1247–1255.
16. Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.

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, SU: Nedra, 1986 (in Russian).
- [3] P.A. Stepin, *Strength of Materials*. Moscow, SU: Vysshiaia Shkola, 1988 (in Russian).
- [4] O.M. Terentiev et al., "Energetic parameters of recoil during explosion-mechanical drilling", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 5, pp. 17–23, 2016 (in Ukrainian). doi: 10.20535/1810-0546.2016.5.71981
- [5] O. Terentiev et al., "Mechanism of creating the prefracture zone of rock formations with magnetic and hydrocavitation load", *Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 353–355, 2015.
- [6] O.M. Terentiev and I.M. Strelsova, "Energy intensity and specific surface energy of rock breaking by magnetic hydrocavitation loading", *Visnyk NTUU KPI. Ser. Girnytstvo*, no. 28, pp. 29–35, 2015 (in Ukrainian).
- [7] S.P. Shevchuk et al., "Analytical study of rock cutting mechatron vibration system by flat auger tools", *Naukovyi Visnyk NHU*, no. 3, pp. 29–34, 2016.
- [8] O.A. Temchenko, "Efficiency estimation for open-cast mining technology from the position of energy intensity", *Actualni Problemy Ekonomiky*, no. 9, pp. 250–257, 2015 (in Ukrainian).
- [9] A.S. Andreev et al., *Physics of the Explosion*. Moscow, Russia: Fizmatlit, 2004, (in Russian).
- [10] A.A. Vovk et al., *The Patterns of the Soil and Rock Deformation under Dynamic Loads*. Kyiv, Ukraine: Institute of Hydromechanics of NASU, 1996 (in Russian).
- [11] W.P. Walters and J.A. Zukas, *Fundamentals of Shaped Charges*. New York: John Wiley&Sons, 1989.

- [12] V.E. Fortov, "High-pressure shock waves and extreme matter state", *Uspehi Fizicheskikh Nauk*, no. 4, pp. 347–368, 2007 (in Russian). doi: 10.3367/UFNr.0177.200704c.0347
- [13] G.G. Kashkaradze, *Mechanical Rock Destruction*. Moscow, Russia: Moscow State Univ. Publ., 2004 (in Russian).
- [14] A.V. Chigarov. *Crystallographic and Crystallochemical Database for Minerals and Structural Analogs* [Online]. Available: <http://database.iem.ac.ru/mincryst>
- [15] L.P. Feoktistov, "Thermonuclear detonation", *Uspehi Fizicheskikh Nauk*, no. 11, pp. 1247–1255, 1998 (in Russian).
- [16] T.D. Golf-Raht, *Fundamentals of Oilfield Geology and the Development of Fractured Reservoirs*. Moscow, SU: Nedra, 1986 (in Russian).

О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь

ТЕХНОЛОГИЯ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД КОМБІНОВАНИМ ВИБУХО-МЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Проблематика. Буріння шпурів у скельних гірських породах характеризується енергоємністю понад 120 кВт·год/м³. Це зумовлено тим, що близько 90 % енергії витрачається на "підготовку" гірських порід до руйнування. Наше дослідження пропонує доповнити механічне навантаження вибуховим для зниження енергоємності руйнування гірських порід.

Мета досліджень. Розробка енергоефективної технології руйнування гірських порід комбінованими вибухо-механічними навантаженнями.

Методика реалізації. Аналітичні дослідження; регресійний аналіз; математичне моделювання; експериментальні дослідження; техніко-економічний аналіз.

Результати досліджень. Експериментально доведено зниження енергоємності вибухо-механічного руйнування гірських порід на 4–16 %.

Висновки. У результаті впровадження вибухо-механічного руйнування гірських порід на створеному повнорозмірному експериментальному пристрої коефіцієнт корисної дії зріс з 77 до 80 %.

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

О.М. Терентьев, П.А. Гонтарь

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД КОМБИНИРОВАННОЙ ВЗРЫВО-МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

Проблематика. Бурение шпуров в скальных горных породах характеризуется энергоёмкостью более 120 кВт·ч/м³. Это обусловлено тем, что около 90 % энергии расходуется на "подготовку" горных пород к разрушению. Данное исследование предлагает дополнить механическую нагрузку взрывной для снижения удельной энергоёмкости разрушения горных пород.

Цель исследований. Разработка энергоэффективной технологии разрушения горных пород комбинированными взрыво-механическими нагрузками.

Методика реализации. Аналитические исследования; регрессионный анализ; математическое моделирование; экспериментальные исследования; технико-экономический анализ.

Результаты исследований. Экспериментально доказано снижение удельной энергоёмкости взрыво-механического разрушения горных пород на 4–16 %.

Выводы. В результате внедрения взрыво-механического разрушения горных пород на созданном полноразмерном экспериментальном устройстве коэффициент полезного действия вырос с 77 до 80 %.

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

Рекомендована Радою
Інституту енергозбереження
та енергоменеджменту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
21 травня 2017 року