

**С.С. Козлов, к.т.н., доц.  
О.М. Терентьев, д.т.н., проф.  
М.І. Сергієнко, виклад.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИБУХОВИХ РОБІТ НА КАР'ЄРАХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**S. Kozlov, Cand. Eng. Prof. Sc., Assoc. Prof.  
O. Terentiev, Doct. Eng. Sc., Prof.  
M. Sergienko, Assoc. Prof.  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute**

## **INCREASING THE EFFICIENCY OF BLASTING WORKS IN THE QUARRY OF BUILDING MATERIALS**

*При видобуванні природного каменю відкритим способом більшість родовищ мають обводненість до 60 %, що значно ускладнює їх розробку. Обводненість порід призводить до необхідності використання у великому обсязі дорогих водостійких вибухових речовин на їх дроблення.*

*Метою дослідження обрано підвищення ефективності технології порядової вибухової відбійки обводнених тріщинуватих порід при відкритій розробці родовищ корисних копалин. При цьому зменшено на 10 % енергоємність руйнування породного масиву використанням внутрішнього енергетичного потенціалу води у тріщинах масиву, що підривається. Для найбільш поширених на кар'єрах відстанях між рядами зарядів (3–7) м і масі заряду в свердловині (150–250) кг, час уповільнення підриву рядів зарядів змінюється від (50 до 150)·10–3с. Встановлено що буро–вибухові роботи з попереднім осушенням води у тріщинуватому масиві дозволили розширити сітку свердловин у обводнених масивів середньо–блочної будови на (12–14) %, крупноблочної будови на (16–18) % і відповідно, зменшити питомі витрати водостійких ВР на (12–14)%. Збільшено вихід підірваної гірничої маси з одного погонного метру свердловини на (6,6–14,1) %, зменшено вихід негабаритних фракцій у гірничій масі на (5,4–6,5) %, і зменшено вихід негабаритних фракцій на 6,5 %. Економічний ефект від впровадження розроблених рекомендацій склав 4,95 тисячі умовних одиниць. Розроблено спосіб порядового підривання тріщинуватих гірських порід, заснований на використанні ефекту утворення локальної воронки осушення в обводненому масиві навколо підіраного в ньому свердловинного заряду ВР.*

*В роботі використано наступні методи: йодометрії – вивчалось розподілення газоподібних продуктів вибуху у моделі; співставлення теоретичних і експериментальних досліджень та їх наукове узагальнення; моделювання – на еквівалентних матеріалах гірських порід обґрунтовані параметри вибуху; аналізу – оцінювались техніко–економічні показники запропонованого способу БВР; швидкісна кінозйомка – процесу розширення газоподібних продуктів кінокамерою СФР.*

*Ключові слова: кар'єр, корисна копалина, свердловина, фільтрація, обводнений, масив, дроблення, вибухівка, детонація.*

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Досвід роботи передових підприємств показав, що результати вибухового дроблення обводнених порід на кар'єрах носять суперечливий характер [1], [2]. Причиною цього є відсутність науково–обґрунтованих способів їх дроблення. Це обумовлено з недостатністю розробки механізму їх вибухового руйнування. Крім того, обводненість порід призводить до необхідності використання з великому обсязі дорогих водостійких вибухових речовин на їх дроблення. Тому дослідження, присвячені вивченню закономірностей руйнування обводнених тріщинуватих скельних порід вибухом і розробка на цій основі ефективних способів їх дроблення, є актуальними.

**Аналіз досліджень.** Проведено аналіз досліджень вибухового руйнування скельних порід [3], [4]. Він показав, що в масивах з блочною будовою передача енергії вибуху через розкриті тріщини, заповнені повітрям, сприяє зменшенню втрат енергії хвилі напружень при переході через них. Однак наявні дані експериментальних досліджень і практики ведення вибухових робіт показують, що, незважаючи, на підвищення рівня напружень, ефективність вибухового дроблення обводнених блокових масивів в порівнянні з сухими масивами в більшості випадків гірше

Ще не з'ясований вплив газоподібних продуктів детонації при вибуховому руйнуванні обводнених блокових масивів. Виробничий досвід показав, що вибухові гази проникають в природні тріщини і пори масиву вже на ранній стадії руйнування. Для встановлення параметрів динамічної фільтрації підземних вод у обводнених масивах розроблена методика вимірювання форми і розмірів локальної воронки осушення при вибуху одиночних свердловинних зарядів ВР. Перед проведенням вимірів визначалися структурні та гідрогеологічні властивості порід кар'єрів. Результати вимірювань показали, що вибух свердловинного заряду ВР викликає активну фільтрацію підземних вод в навколишньому масиві [5]. В результаті утворюється локальна воронка осушення масиву. Параметри її формування характеризуються нерівномірністю розвитку в часі за обсягом масиву [6].

**Ідея роботи.** Використання ефекту осушення локальної ділянки обводненого блочного масиву вибухом свердловинного заряду ВР для розробки технології порядової відбійки та зниження енерговитрат.

**Мета і задачі дослідження.** Підвищення ефективності технології порядової вибухової відбійки обводнених тріщинуватих порід при відкритій розробці родовищ корисних копалин

### **Задачі дослідження.**

1. Зменшити енергоємність руйнування породного масиву використанням внутрішнього енергетичного потенціалу води у тріщинах масиву, що підривається вибухом;

2. Визначити закономірності формування параметрів локальної воронки осушення обводненого масиву навколо підірваного заряду вибухової речовини від властивостей середовища і параметрів вибухового навантаження масиву;

3. Встановити раціональну відстань між рядами зарядів, масі заряду в свердловині, діапазону часу уповільнення підриву рядів зарядів;

4. Збільшити вихід підірваної гірничої маси з одного погонного метру свердловини, зменшити вихід негабаритних фракцій у гірничій масі;

5. Розробити методику, що враховує ефект осушення локальної ділянки обводненого масиву під час вибуху свердловинних зарядів та положення щодо визначення параметрів порядової вибухової відбійки обводнених порід.

**Новизна** – відмінність роботи від результатів інших авторів. Відпрацьовано технологію видалення води із зони дії вибуху, в результаті чого навколо підірваного заряду утворюється локальна воронка осушення масиву.

Досягнуто запобігання витрат енергії та подолання опору води в тріщинах обводненого масиву.

Використана нова методика визначення параметрів БВР яка відрізняється тим, що дозволяє підвищити якість дроблення при зниженні питомої витрати водостійких ВР в масивах скельних порід крупно і середньо блочної будови.

**Практична цінність.** Розроблено спосіб порядового підривання тріщинуватих гірських порід, заснований на використанні ефекту утворення локальної воронки осушення в обводненому масиві навколо підірваного в ньому свердловинного заряду ВР.

Встановлено інтервали уповільнення між вибухами серій зарядів у взаємозв'язку з параметрами видалення води з тріщин, щоб забезпечити створення локальних ділянок осушення масиву в зоні дроблення наступних серій зарядів.

Запропонована і випробувана в реальних умовах роботи кар'єру методика визначення параметрів сітки свердловин з урахуванням зміни форми і розмірів зони їх дроблення по відношенню до сухих масивів.

Запропонований спосіб, який поряд з поліпшенням якості дроблення забезпечує збільшення виходу підірваної гірничої маси з одного погонного метра свердловини і зниження витрати водостійких ВР.

**Методи досліджень.** Для досягнення поставленої мети, використано наступні методи:

- методом йодометрії вивчалось розподілення газоподібних продуктів вибуху у моделі;
- методом співставлення теоретичних і експериментальних досліджень проведено їх наукове узагальнення;
- методом моделювання на еквівалентних матеріалах гірських порід обґрунтовувались параметри вибуху;
- методом порівняння оцінювались результати промислових та лабораторних експериментів;
- методом аналізу оцінювались техніко–економічні показники запропонованого способу БВР;
- швидкісна кіно–камера СФР для кінозйомки процесу розширення газоподібних продуктів.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

Для визначення чинника (динамічної або квазістатичної складової вибуху), який здійснює відгін води, проведені виміри розподілу газоподібних продуктів вибуху в моделях блокових масивів і часу відгону води по тріщинах. Модель уявляла блок прозорого оргскла, в якому імітувались дві природні окремісті масивів середньо– і крупноблочної будови, розділені розкритою тріщиною. Для підготовки експериментальних досліджень використано “Теорію фізичного моделювання”. Моделювання ґрунтується на заміщенні реальних об'єктів їх умовними зразками, аналогами. У моделях відтворювались властивості і зв'язки досліджуваних систем і процесів. Шпуровий заряд ВР розташовувався в центрі однієї з окремістей паралельних площині штучної тріщини.

Випробування показали, що з 71,3 % загального обсягу газів вибуху, що проникли в зруйноване середовище – у розкриті тріщину проникло від 27,3 % до 32,7 % їх обсягу. При цьому велика частина цього обсягу газів вибуху (від 16,5 % до 20,6 %) виривалися з розкритою тріщини за межі моделі. Цифровий матеріал отримано з експериментальних досліджень після статистичної обробки їх результатів. Для експериментальних досліджень обрано критерій мінімуму кількості дослідів. Перевагу надано повночинниковому експерименту типу 2<sup>k</sup>. Він дозволив використовувати 2 рівні

варіювання 3–х чинників по 8 дослідів, чого достатньо для досягнення околу точки оптимуму.

При проведенні другої частини експериментів штучна тріщина заповнювалася водою. Процес розширення газоподібних фіксувався за допомогою швидкісної кінозйомки (камера СФР). Визначалися тимчасові параметри відгону води з розкритою тріщини моделі. Аналіз кінограм вибухового руйнування моделей показав, що гази вибуху, поширюючись по новоствореним від дії хвилі напружень тріщин, проникали в штучну тріщину моделі і відганяли воду, що міститься в ній, за її межі. Час появи води з тріщини, що розділяє окремо, склало  $(120-140) \cdot 10^{-6}$  с. При цьому час приходу хвилі напружень до розкритої тріщини склало  $(36-40) \cdot 10^{-6}$  с. Порівняння тимчасових інтервалів показало, що відгін води з розкритої тріщини моделі відбувається на порядок пізніше дії хвильових процесів. Відгін води відбувається внаслідок впливу тиску проникаючих в тріщину газів вибуху.

**Результати і їх обговорення.** Результати досліджень використані для розробки способу підривання обводнених порід і методики визначення параметрів поліпшення якості вибухового дроблення. В основу способу покладено використання внутрішнього енергетичного потенціалу води у тріщинах масиву, що підривається, вибухом першого ряду свердловинних зарядів. Вибух створює передруйнівну зону за рахунок відгону води газами вибуху. Він також створює зону осушення масиву в наступній зоні дроблення. Таким чином, до 10 % зменшується енергоємність руйнування породного масиву.

Спосіб ґрунтується на уповільненому підриванні зарядів ВР [6]. При цьому вибухом першого ряду свердловинних зарядів за рахунок відгону води розширюються газами вибуху осушується зона дроблення наступного (другого) ряду зарядів, який вибухає по відношенню до першого з інтервалом часу уповільнення, рівним часу відгону підземних вод із зони дроблення цього (другого) ряду. У результаті другий ряд свердловинних зарядів вибухає в осушеній частині раніше обводненого масиву. У свою чергу, вибух другого ряду зарядів створює зону осушення масиву в зоні дроблення третього ряду, що вибухає по відношенню до другого ряду з таким же інтервалом уповільнення.

Почерговим підриванням рядів свердловинних зарядів проводиться поетапне осушення обводненого масиву. При підриванні обводнених порід пропонуємою технологією відгін води здійснюється в процесі підривання уступів, і тільки з розкритих тріщин масиву. Тому заряджання обводнених свердловин здійснюється водостійкими або комбінованими ВР. Найкращі умови відгону води при підриванні тріщинуватих порід забезпечується застосуванням порядкових схем з прямолінійною конфігурацією фронту відбійки [7]. В польових умовах встановлено повний збіг великої осі воронки осушення масиву з системою тріщин. Тому для забезпечення максимальних розмірів зони осушення напрямком фронту відбійки має збігатися з азимутом простягання системи розкритих тріщин. Залежно від орієнтування напрямку системи цих тріщин до лінії вибою (кут  $\alpha$ ) рекомендується застосовувати різні схеми підривання [8]. При значеннях  $\alpha = 20-660$  – використовують діагональні схеми, в інших випадках – комбіновані схеми КЗД. При  $\alpha = 0-200$  – поперечно – діагональну, при  $\alpha = 60-900$  – поздовжньо-діагональну.

Інтервал уповільнення між вибухами рядів зарядів, що підриваються ВР вибирається позиції створення вибухом першого ряду локальної воронки осушення масиву в зоні дроблення подальшого (другого) ряду до моменту його вибуху.

Аналіз показав, що для найбільш поширених на кар'єрах відстанях між рядами зарядів (3–7) м і масі заряду в свердловині (150–250) кг, час уповільнення змінюється від  $(50 \text{ до } 150) \cdot 10^{-3}$  с. Проведеними вимірами параметрів воронок дроблення при вибуху одиночних свердловинних зарядів ВР встановлено збільшення їх розмірів в сухих масивах по відношенню до обводнених [9]. Застосування зазначеної технології

виробництва БВР з урахуванням осушення масиву дозволяє розширити сітку свердловин при підриванні обводнених масивів середньо–блочної будови на (12–14) %, крупноблочної будови на (16–18) % і, відповідно, зменшити питому витрату водостійких ВР.

Ефективність застосування розробленого способу вибухової відбійки обводнених порід підтвердилися промисловими дослідженнями на кар'єрах України.

Для проведення експериментів вибиралися масиви середньо– і крупноблочної будови з усередненим по блоку рівнем стовпа води в свердловинах, що перевищує 1/3 їх глибини. Для більш наочного порівняння результатів кожен з експериментальних вибухів проводився на одному блоці, який поділявся на дві частини – дослідну і контрольну. На дослідних ділянках експериментальних блоків параметри сітки свердловин були розширені з урахуванням отриманих для цих ділянок змін розмірів зон дроблення від вибуху одиночного заряду ВР з сухих масивах по відношенню до обводнених. Залежно від орієнтації основної системи тріщин до лінії відкосу уступу вибиралася схема підривання [10]. Конструкції зарядів і тип ВР приймалися згідно паспортів БВР, прийнятих на кар'єрах.

Результати вибухів оцінюють по виходу підірваної гірничої маси, гранулометричного складу підірваної породи і виходу негабаритних фракцій. Результати перевірки показали ефективність застосування розробленої технології підривання обводнених порід. Залежно від категорії блочності масивів фільтраційних до структурних властивостей порід, отримано збільшення виходу підірваної гірничої маси з одного погонного метру свердловини на (6,6–14,1) %, зменшенні виходу негабаритних фракцій у гірничій масі на (5,4–6,5) %.

Рівняння руху води в тріщині під діями розширюючих газів вибуху в напрямку осі X, яка перпендикулярна осі Z, суміщеної з віссю заряду:

$$m d^2x/dt^2 = F_p - F_c = \frac{m d^2x}{dt^2} = P_o e^{-at} - \frac{dx}{dtS} \cdot \frac{8\mu}{\rho r^{-2}} \quad (1)$$

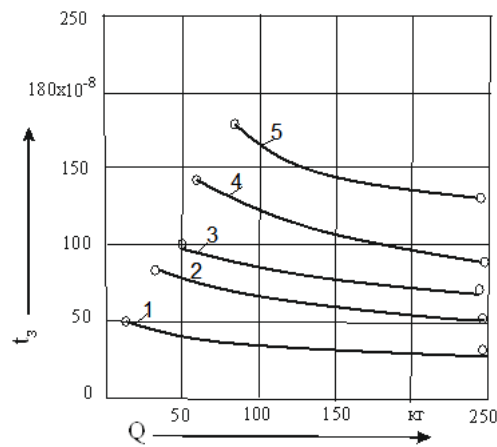
де  $m$  – маса води в тріщині;  $dx^2/dt^2$  – прискорення витиснення води з тріщини;  $F_p = P_o e^{-at}$  – сила зовнішнього тиску газів вибуху на воду;  $F_c = q \cdot \beta \cdot l = \frac{dx}{dtS} \cdot \frac{8\mu}{\rho r^{-2}}$  – сила опору руху води по тріщині;  $q = dx/dtS$  – фільтраційна витрата води;  $\beta = 8 \mu / (\rho r^{-2})$  – коефіцієнт гідродинамічного опору фільтрації;  $\mu$  і  $\rho$  – відповідно: густина і щільність рідини в тріщині масива;  $r$  – приведений радіус тріщини;  $P_o$  – початковий тиск газів вибуху;  $a$  – показник ступені, що характеризує інтенсивність падіння тиску в часі:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} \frac{\beta}{\rho} = \frac{P_o}{\rho l} e^{-at} \quad (2)$$

Результати експериментальних вимірювань параметрів динамічної фільтрації підземних вод дозволили визначити значення коефіцієнта  $a$  і показника ступеню  $\beta$  у формулі (2) для зарядів різної маси і розрахувати їх значення в залежності від радіуса свердловин і відстані між рядами зарядів  $Q$  які наведені на рис. 1. Аналіз даних малюнка показує, що для найбільш поширених на кар'єрах відстанях між рядами зарядів 3–7 м і масі заряду в свердловині 150–250 кг, змінюється від  $(50 \text{ до } 150) \cdot 10^{-3}$  с.

Порівняння результатів вимірювань показало, що зі збільшенням розкриття тріщин з  $(5 \text{ до } 20) \cdot 10^{-3}$  м, розміри зони осушення при інших рівних умовах збільшуються на (25–30) %. Різниця в параметрах утворення локальних зон осушення свідчить про те, що в анізотропних блокових масивах підземні води відганяються далі і швидше в напрямку системи розкритих тріщин [11]. Конфігурація зон осушення масивів середньо– і крупноблочної будови в плані уступу наближається до форми еліпса, із співвідношенням великих і малих осей в межах 1,25–1,35. Найкращий відгін води при підриванні

тріщинуватих порід забезпечуються застосуванням порядних схем КВЗ з прямолінійною конфігурацією фронту відбійки.



**Рисунок 1 – Зміна інтервалу уповільнення  $t_3$  від маси заряду в свердловині  $Q$  і відстані між зарядами  $a$ : відповідно 1, 2, 3, 4, 5; від радіусу свердловини  $a/r_3 = 40, 50, 60, 70, 80$  відповідно**

У таблиці 1 наведені параметри формування локальної воронки осушення в обводненому середньо блоковому масиві навколо підірваної свердловини: ВР грамоніт ЗС/70; свердловині діаметром 0,123 м; глибиною 14,0 м; зарядом В масою 100 кг; з висотою стовпа води 7,0 м.

**Таблиця 1– Параметри формування локальної воронки осушення в масиві**

Відстань від заряду		Час відгону води з тріщини, $t_{oc} \cdot 10^{-3}, c$	Швидкість фільтрації, $U_{oc}, m/c$	Висота зони осушення, $H_{oc}, m$
Абсолютна, $R_{oc}, m$	Відносна, $R_{oc}/r_3, m$			
2,1	40	38/45	55,2/48,8	7,0/7,0
2,6	50	52/70	50,3/37,1	8,5/8,0
3,2	60	74/105	43,2/29,5	10,2/9,5
3,7	70	98/120	37,7/30,8	11,5/10,5
4,2	80	140/160	30,0/26,5	12,6/11,5

**Примітка:** чисельник  $\delta = (15 - 20) \cdot 10^{-3}$  м у напрямку розкритих тріщин, знаменник  $\delta = (3 - 5) \cdot 10^{-3}$  м – у напрямку системи щільно зімкнутих тріщин.

**Практична значущість результатів.** В результаті впровадження розробленого способу підривання обводнених порід на Шепетівському кар'єрі об'єднання «Укрнерудпром», вихід підірваної гірничої маси з одного погонного метру свердловини збільшився на 14,1 %. Досягнуто зниження питомих витрат ВР на (12–14) % і зменшено вихід негабаритних фракцій на 6,5 %. Економічний ефект від впровадження розроблених рекомендацій склав 4,95 тисячі умовних одиниць.

## ВИСНОВОК

1. Зменшено на 10 % енергоємність руйнування породного масиву використанням внутрішнього енергетичного потенціалу води у тріщинах масиву, що підривається, вибухом першого ряду свердловинних зарядів, який утворює перед руйнівну зону у

другому ряді за рахунок відгону води газами вибуху і створює зону осушення масиву для наступного ряду дроблення.

2. Для найбільш поширених на кар'єрах відстанях між рядами зарядів (3–7) м і масі заряду в свердловині (150–250) кг, час уповільнення підриву рядів зарядів змінюється від  $(50 \text{ до } 150) \cdot 10^{-3} \text{ с}$ .

3. Буро–вибухові роботи з попереднім осушенням води у тріщинуватому масиві дозволили розширити сітку свердловин у обводнених масивів середньо–блочної будови на (12–14) %, крупноблочної будови на (16–18) % і відповідно, зменшити питомі витрати водостійких ВР на (12–14) %.

4. Збільшено вихід підірваної гірничої маси з одного погонного метру свердловини на (6,6–14,1) %, зменшено вихід негабаритних фракцій у гірничій масі на (5,4–6,5) %, і зменшено вихід негабаритних фракцій на 6,5 %. Економічний ефект від впровадження розроблених рекомендацій склав 4,95 тисячі умовних одиниць.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В.В. Бойко, В.Г. Кравець, А.М. Шукюров, Т.В. Хлевнюк, та А.Л. Ган, “Спосіб формування свердловинного заряду вибухової речовини при проведенні масових вибухів”, *UA МПК: F42D 3/04, F42D 1/08. № 135668*, Лип. 10, 2019.
- [2] В. Г. Кравець, В.В. Коробійчук, О.А. Зубченко, *Руйнування гірничих порід вибухом: навчальний посібник*, ЖДТУ, 2012, 164 с. ISBN 978–966–683–328–3
- [3] О.М. Терентьев, А.Й. Клещов, А.І. Крючков та М.І. Сергієнко, “Технологічні параметри руйнування гірських порід при класичному і молекулярно–хвильовому підходах”, *Науковий журнал “Енергетика: економіка, технології, екологія”*, Вип. 1, 2019. с.74–82. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813–5420.1.2019.182614>
- [4] С. Г. Оника, А. К. Стасевич, А.К. Кузьмич, “Разрушение горных пород взрывом: учебник. Беларусь, Минск: БНТУ, 2020, 112 с. ISBN 978–985–583–137–3
- [5] Б.Н. Кутузов, *Методы ведения взрывных работ. Часть 1. Разрушение горных пород взрывом: учебник*. М., Издательство МГУ, 2018, 476 с. ISBN: 978–5–98672–145–3
- [6] В. П. Куринной, *Теоретические основы взрывного разрушения горных пород: монография*, Днепр: Изд–во , 2018, 280 с. <https://core.ac.uk/download/pdf/168413087.pdf>
- [7] А.Л. Ган, В.Г. Кравець, В.В. Бойко, та О.В. Ган, “Вплив ультразвукового опромінення на утримуючу здатність аміачної селітри”. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. № 2 (84)*, 2019, с.126–135. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2019-2\(84\)-126-132](https://doi.org/10.26642/ten-2019-2(84)-126-132)
- [8] О.М. Терентьев, А.Й. Клещов, М.І. Сергієнко, “Статико–динамічне рихлення мерзлих порід”, *Геоінженерія, №1*, 2020, с. 28–39. DOI: <https://doi.org/10.20535/2707–2096.1.2020.193971>
- [9] В. Г. Кравець, А.Л. Ган, А.П. Воеводка, та А.А. Желтоножко, “Вибір енергетично оптимальних рецептур вибухових сумішей на основі утилізованих вибухових речовин”, *НТУУ “КПІ”, Серія “Гірництво”, Вип.16*, 2012, с. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.20535/2079–5688.2008.16.81953>
- [10] В.Г. Кравець, В.В. Вовк, В.В. Котенко, та О.М. Терентьев, *Прикладна геодинаміка вибуху в гірництві та геотехнічному будівництві: монографія*, Житомир, ЖДТУ, 2012.–164 с. ISBN 978–966–683–351–1

Стаття надійшла до редакції 04.02.21.