ГІРНИЦТВО
MINING

УДК 622.063.23
https://doi.org/10.31474/2073-9575-2024-1(31)-2(32)-7-16

І.Г. Сахно
С.В. Сахно
Н.В. Зуєвська
О.П. Богомаз
А.В. Погосян

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ НЕВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ПРИКЛАДІ КАР'ЄРУ ПО ВИДОБУТКУ ГРАНІТОЇДІВ

Мета. *Визначення робочого температурного режиму невибухової руйнуючої суміші на основі оксиду кальцію в різних температурних полях з діапазону весняно-літнього періоду, характерного для України.*

Методика. *У роботі використано методи лабораторного моделювання, польових випробувань, інженерного аналізу, синтезу, статистичної обробки.*

Результати. *Розвинена гірничодобувна галузь є привабливою галуззю для впровадження НРС в Україні. Основні причини стримання широкого впровадження НРС є їх висока чутливість до температури навколишнього середовища і тривалий час руйнування, що обумовлений тривалим гідратаційним твердінням суміші. Результати досліджень вказують, що час початку гідратації і зростання обсягу структурних новоутворень експоненційно залежать від температури матеріалу, що містить НРС. При температурі навколишнього середовища 50°С і більше НРС не працює у встановленому режимі, спостерігається стрибкоподібне підвищенні температури і відповідне збільшення обсягу суміші при неконтрольованому розширенні. Таким чином верхня межа робочого діапазону температури суміші становить 50 градусів. Критичною температурою гранітоїдів, в польовому експерименті стала температура 39 градусів. Польові експерименти підтвердили, що підвищення температури призводить до прискорення швидкості гідратації невибухових руйнуючих сумішей і може скоротити час руйнування вдвічі.*

Наукова новизна *полягає у встановленні закономірностей зміни швидкості гідратації невибухових руйнуючих сумішей на основі оксиду кальцію в різних температурних полях, і середовищах з різною температуропроводністю.*

Практичне значення. *Результати досліджень можуть бути використані при розробці удосконалених сумішей для невибухового руйнування, удосконаленні технології невибухового руйнування при температурах навколишнього середовища вище 30°С.*

Ключові слова: *невибухова руйнуюча суміш, руйнування порід, квазістатичне руйнування, шпур, температурне поле порід.*

Вступ.

У практиці розробки корисних копалин, в основному застосовують буровибуховий спосіб руйнування гірських порід. Динаміт, запатентований Альфредом Нобелем у 1867 році, став ключовим моментом у розвитку гірничої техніки, і протягом 70 років він залишався відомим як вибухівка №1 у світі. Вибухові суміші на основі аміачної селітри почали поступово використовувати в середині XX століття. Відтоді цей вибуховий матеріал відіграє важливу роль у гірничому будівництві, особливо для твердих порід, які потребують значної енергії вибуху. Зараз гірничі проєкти, що передбачають вибухове руйнування гірських порід реалізуються в 168 країнах світу, а використання вибухівки збільшується. Очікується, що споживання вибухових речовин до 2027 року досягне 29100 кілотонн. Широке використання вибухового способу руйнування гірських порід пояснюється наступними його перевагами: висока руйнівна здатність, мобільність та універсальність. Однак при всіх своїх перевагах спосіб має ряд серйозних недоліків, які загострюються через тренд на посилення вимог безпекових регламентів і екологічних норм: велике виділення газоподібних продуктів вибуху (що йде в розріз з політикою декарбонізації); шум, сейсмічна дія, особливі заходи безпеки при

зберіганні, перевезенні та використанні (що підвищують ризик аварій і нещасних випадків).

Щоб подолати недоліки традиційного вибухового руйнування було розроблено декілька сучасних підходів як практичні рішення для руйнування гірських порід за безпечних та екологічно чистих стандартів. Розроблені сучасні методи були впроваджені як нетрадиційні методи руйнування міцних гірських порід і бетону та альтернативи методу вибухових робіт.

Для зменшення цих недоліків розроблені спеціальні способи м'якого підривання та різні конструкції шпурових зарядів. Наприклад, спосіб м'якого підривання за допомогою пластикових зарядів [1] дозволяє забезпечити безпеку та мінімальний рівень витрат на руйнування порід завдяки низькій чутливості до механічних впливів, технологічності заряджання шпурів, низькій теплоті вибуху (1500 кДж/кг) за швидкості детонації 1800 м/с. Останнім часом все більше застосування знаходять статичні способи руйнування – механічними клинами, гідроклинами, за допомогою гідроспліттерів, орієнтованого флюїдорозриву, електрогідравлічних установок [2-5] та ін. Спосіб руйнування порід за допомогою механічних клинів має низьку продуктивність при високій трудомісткості робіт, інші перелічені способи невибухового руйнування вимагають використання дорогих матеріалів, обладнання, енергії, високих витрат. Тому одним із їх головних конкурентів, які позбавлені багатьох перелічених недоліків, є спосіб руйнування за допомогою невибухових руйнівних сумішей [4].

Для невибухового руйнування гірських порід і будівельних конструкцій у світовій практиці в основному застосовуються невибухові руйнуючі суміші (НРС) японських (Брістар, С-Майт, Калміт, Сумик та ін.), європейських (Бетонаміт, Делікс, Цеваміт, Ді-вікрет та ін.) виробників. Українським аналогом цих складів є НРВ-80 [6]. Основним реагентом, сучасних НРС є оксид кальцію, гідратаційне твердіння якого супроводжується розширенням в твердій фазі розчину. Сьогодні є позитивний досвід руйнування міцних гірських порід за допомогою НРС у практиці відкритих гірських робіт.

Розвинена гірничодобувна галузь є привабливою галуззю для впровадження НРС в Україні. Застосування НРС потенційно можливе при видобутку цінних порід з високими стандартами відносно тріщинуватості (лабрадорити, мрамори і т .ін.), вторинному дробленні негабаритних блоків, в комбінаціях з вибуховим способом в умовах необхідності керування напружено-деформованим станом. Однак незважаючи на привабливі перспективи зазначений спосіб руйнування не знаходить широкого застосування.

Однією з основних причин цього є висока чутливість невибухових сумішей до температури навколишнього середовища. Наслідком порушення температурного режиму є мимовільний викид суміші зі шпурів. Серед інших важливих причин – тривалий час руйнування, що сягає 8-24 годин.

Тому завданням наведеного дослідження було вивчення впливу температурного режиму і властивостей порід на швидкість гідратації окису кальцію, що дозволить розробити способи скорочення часу руйнування і виключити явище мимовільного викиду НРС зі шпуру.

Факт впливу температури навколишнього середовища на швидкість руйнування порід невибуховими сумішами відомий [7-10], відома закономірність зниження тиску саморозширення НРС при зниженні температури [8], досліджено вплив температури навколишнього середовища на швидкість гідратації. При цьому основну увагу дослідники звертали на зниження ефективності роботи НРС в умовах низьких позитивних температур. При цьому стандартизовані випробування більшості невибухових сумішей проводяться при температурі 20 градусів Цельсія, а верхнім порогом температури встановлюється межа 30 градусів. Для умов руйнування порід на кар'єрах України в весняно-літній період масив порід у переважній більшості випадків має температуру понад 20°С. Тому актуальним питанням є вивчення особливостей роботи невибухових руйнуючих сумішей у температурних полях властивих породам і навколишньому середовищу, українських гірничодобувних підприємств.

Основні результати.

Швидкість руйнування матеріалів за допомогою НРС залежить від інтенсивності підвищення тиску саморозширення до можливого максимуму, а оскільки швидкість зростання тиску саморозширення визначається утворенням і зростанням нових кристалів в результаті фізико-хімічних перетворень при гідратації оксиду кальцію, актуальним є питання дослідження факторів, що впливають на швидкість гідратації. Проведення експериментальних робіт із застосування НРС для руйнування гірських порід в умовах підземних гірничих виробок дозволило зробити висновок про суттєву невідповідність у швидкості зростання тиску саморозширення, що одержане в лабораторних умовах з натурними спостереженнями, навіть при їх роботі в одному температурному полі. Для вивчення цього явища було проведено лабораторні дослідження особливостей перебігу реакції гідратації в різних матеріалах, що вміщують заряд НРС.

Виготовлений розчин НРС за допомогою шприца поміщали в циліндричні оболонки діаметром 2 см з різного матеріалу; як матеріал оболонок застосовували пінопласт (1), пластик (2), дерево (сосна) (3), гіпс (4), сталь (5), обсяг розчину НРС в оболонках становив 2 см^3. Температура навколишнього середовища під час експерименту становила 23°С.

Відомо, що як індикатор швидкості процесу гідратації може виступати зміна температури НРС. Тому всередину оболонки з НРС встановлювали електронний лабораторний термометр з точністю 0,1°С. Після цього за допомогою відеозйомки фіксували зміну температури матеріалу в часі. Після обробки результатів експерименту отримали графіки, що характеризують швидкість гідратації НРС поміщеного в оболонки з різних матеріалів (рис. 1).

Аналіз результатів експерименту показує, що НРС поміщений при однаковій температурі в матеріали з різними теплофізичними властивостями має різну швидкість гідратації, а також різну швидкість і абсолютну величину збільшення обсягу. В якості критерію, що дозволяє врахувати теплофізичні властивості матеріалів доцільно прийняти коефіцієнт температуропровідності; так для проведеного експерименту температуропровідність становить для: пінопласту - 0,000130 м^2/с, пластику - 0,000199 м^2/с, сосни - 0,000212 м^2/с, гіпсу - 0,000382 м^2/с, сталі - 0,01273 м^2/с.

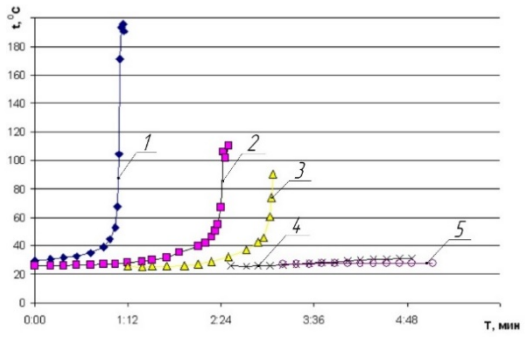


Рис. 1. Графіки зростання температури НРС в оболонці з різних матеріалів 1 – пінопласт, 2 – пластик, 3 – дерево (сосна), 4 – гіпс, 5 – сталь

Оскільки процес, що розглядається, є екзотермічний, а на швидкість реакції гідратації істотний вплив оказує температура, то слід враховувати теплообмінні процеси між НРС і матеріалом, що його вміщує. Іншими словами відбувається розсіювання теплової енергії від складу НРС, що самонагрівається в результаті фізико-хімічних перетворень, в навколишній масив. Чим більше теплової енергії зберігає склад, тим вище швидкість його гідратації і зростання структурних новоутворень. Моделювання при нестаціонарних режимах повинно виконуватися з дотриманням критеріїв подібності теплопровідності, які залежать від розмірів тіла та коефіцієнта його температуропровідності:

$$F_o = \frac{a \cdot t}{L^2}$$

де a - коефіцієнт температуропровідності;

t - характерний час зміни зовнішніх умов, години;

L - характерний розмір тіла, м.

$$a = \frac{\chi}{c_p \cdot \rho}$$

де χ - теплопровідність, Вт/(м·К);

c_p - ізобарна питома теплоємкість, кДж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$;

ρ - щільність, кг/м^3.

При моделюванні імітується заряд НРС поміщений в ампулі в шпур діаметром 0,04 м пробурений в блоці пісковика розмірами 0,5х0,5х0,3 м. В якості матеріала, що містить НРС при моделюванні приймається вода. Необхідний діаметр (L) оболонки з водою, при діаметрі оболонки з НРС при моделюванні дорівнює 0,04 м, і однаковому часі зміни зовнішніх умов (нагрівання НРС при гідратації), розрахуємо з урахуванням наведеного вище критерію подібності:

$$\frac{\chi_{песч} \cdot t}{c_{p\,песч} \cdot \rho_{песч} \cdot L_{песч}^{\,2}} = \frac{\chi_{H2O} \cdot t}{c_{p\,H2O} \cdot \rho_{H2O} \cdot L_{H2O}^{\,2}}$$

$$L_{H2O} = \sqrt{\frac{\chi_{H2O} \cdot c_{p_{песч}} \cdot \rho_{песч} \cdot L_{песч}^{\,2}}{c_{p\,H2O} \cdot \rho_{H2O} \cdot \chi_{песч}}}$$

підставив данні, отримаємо

$$L_{H2O} = \sqrt{\frac{0{,}58 \cdot 0{,}84 \cdot 2500 \cdot 0{,}5^2}{4{,}183 \cdot 1000 \cdot 2}} =$$

0,19м.

З урахуванням отриманих результатів був проведений експеримент, в якому приготований розчин НРС поміщався в тонку гумову оболонку діаметром 0,04 м довжиною 0,25 м всередину якої встановлювали лабораторний електронний термометр для фіксації температури суміші при гідратації. Ця конструкція поміщалася в прозору оболонку циліндричної форми діаметром 0,19 м наповнену водою на висоту 30 см. На циліндричній оболонці була нанесена шкала для фіксації об'ємних змін НРС. Температура затвореного розчину на початку всіх експериментів складала 22°С.

Температура води при проведенні моделювання змінювалася в діапазоні 20-50°С, протягом кожного експерименту короткочасне відхилення температури води від заданого протягом досліду могло становити 1°С, що пов'язано з технічною стороною експерименту. Опрацьовано діапазон 30-40 градусів, оскільки в цьому діапазоні знаходиться температура порід в літньо-весняний період.

Графік зміни температури НРС та його об'ємних змін залежно від температури навколишнього середовища наведено на рис 2.

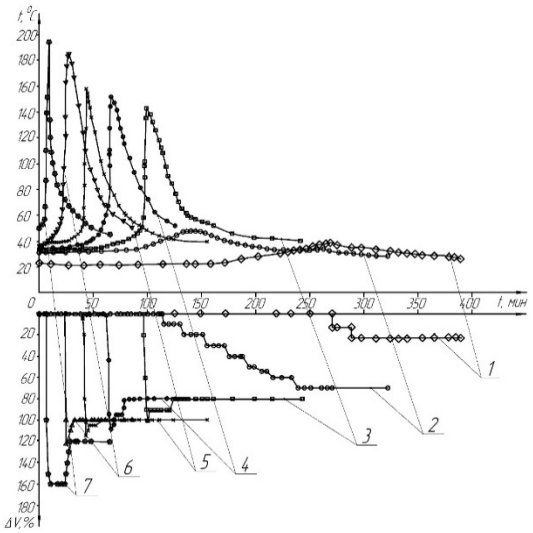


Рис. 2. Зміна температури НРС (t, °С) та його об'ємних змін (ΔV, %) в часі (t, хв) при температурі навколишнього середовища: 1 - 20°С, 2 - 30°С, 3 - 32°С, 4 - 35°С, 5 - 37°С, 6 – 42°С, 7 - 50°С.

Аналіз результатів проведених експериментів показує, що підвищення температури навколишнього середовища призводить до інтенсифікації швидкості гідратації і відповідно до збільшення об'ємних змін матеріалу. Так при температурі навколишнього середовища 20°С зростання температури НРС починається через 175 хвилин після затворення розчину, а об'ємні зміни через 270 хвилин. Початок об'ємних змін матеріалу починається при температурі 40°С. Максимальне збільшення обсягу матеріалу досягає 20% від початкового, температура НРС повертається до початкової через 360 хвилин, зміна обсягу матеріалу не відбувається. При температурі навколишнього середовища 30°С, зростання температури НРС починається через 90 хвилин після замішування розчину, а об'ємні зміни через 120 хвилин, початок об'ємних змін матеріалу починається при температурі НРС близько 40°С, що характерно для всіх

експериментів. Максимум досягнутої температури складає 45 градусів. Слід зазначити, що обсяг НРС плавно збільшується протягом 120 хвилин незважаючи на зниження температури з 45°С до 33°С.

При температурі навколишнього середовища 32, 35, 37, 42, 50°С спостерігається інший характер роботи НРС, що полягає в різкому стрибкоподібному підвищенні температури складу при досягненні ним позначки близько 50°С, і відповідне збільшення обсягу матеріалу. Підвищення початкової температури навколишнього середовища до 32, 35, 37, 42, 50°С призводить до початку зростання температури НРС через 60, 40, 30, 18 і 4 хвилини відповідно, а період інтенсивного зростання температури та обсягу НРС починається через 95, 64, 40, 18 та 5 хвилин відповідно. Максимальна температура при цьому змінюється від 150 до 195°С, а обсяг збільшується на 100-160%. Графіки, що характеризують час початку зростання температури НРС і його об'ємних змін при різній температурі матеріалу, що вміщує склад, наведені на рис. 3.

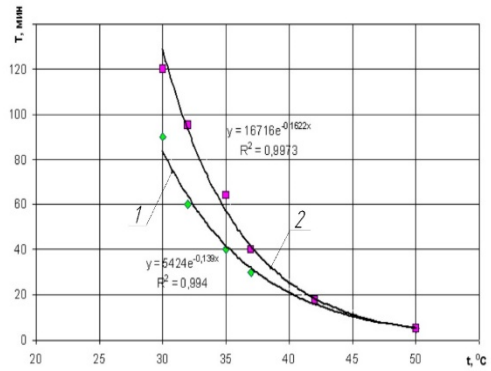


Рис. 3. Графіки залежності часу початку зростання температури НРС (1) та його об'ємних змін (2) при різній температурі навколишнього середовища

Аналіз графіків, представлених на рисунку 3 показує, що час початку гідратації і зростання обсягу структурних новоутворень експоненційно залежать від температури матеріалу, що містить НРС. Так час початку гідратації НРС, індикатором якого служить зростання температури складу, при підвищенні температури об'єкта, що його вміщує, в діапазоні 30-50°С, з коефіцієнтом кореляції 0,994 описується залежністю:

$$T_г = 5424e^{-0,139t}, \text{ хв},$$

а час початку зростання структурних новоутворень, індикатором якого служить зростання обсягу матеріалу, при підвищенні температури об'єкта, що його вміщує, в діапазоні 30-50°С, з коефіцієнтом кореляції 0,997 описується залежністю:

$$T_о = 16716e^{-0,162t}, \text{ хв}.$$

При досягненні складом температури 100°С, починається виділення пароподібних продуктів, обсяг яких становить від 10 до 40% обсягу матеріалу. Охолодження оболонки, що містить НРС, призводить до конденсації пари і зменшення обсягу складу до сухого залишку; конденсована пара повторно реагує з НРС і більше не виділяється. Аналіз складу пароподібних виділень показав, що це водяна пара. Чим інтенсивніше відбувається зростання температури, тим більший обсяг пари, що виділяється: це можна пояснити великою кількістю хімічно незв'язаної води в НРС при підвищенні температури навколишнього середовища.

Аналіз формули реакції основного компонента НРС оксиду кальцію з наведеною нижче водою підтверджує вірність зроблених висновків. При водопорошковому співвідношенні рівному 0,3 речовини реагують без залишку з утворенням гідроксиду кальцію. Підвищення температури складу до закінчення реакції гідратації вище 100°С призводить до википання води та утворення пари. Конденсована пара продовжує реагувати з оксидом кальцію і переходить у хімічно зв'язаний стан.

$$CaO+H_2O=Ca(OH)_2+63,7 \text{ кДж/моль}$$

Таким чином, підвищення температури навколишнього середовища призводить до інтенсифікації процесу гідратації, проте при цьому збільшується частка об'ємних змін за рахунок виділення пароподібних продуктів. Додатковий внутрішній тиск пари сприяє викиду НРС зі шпуру, що є негативним

явищем. Тому управління швидкістю гідратації оксиду кальцію шляхом простого підвищення температури не дозволить підвищити швидкість руйнування об'єктів та ефективність роботи НРС. Так при температурі об'єкта, що руйнується, більше 30°С, при діаметрі шпуру 40 мм для виключення «вишпурювання» необхідне додавання сповільнювачів гідратації. Іншими способами виключення пароутворення є:

- зменшення діаметра шпурів, щоб тепло, що виділяється в процесі реакції, встигало розсіюватися в навколишнє середовище і температура всередині шпуру не досягала позначки 100°С

- використання оболонок, що стабілізують тепловий обмін між сумішшю і породами.

Перевірка результатів лабораторних експериментів була проведена на Хлібодарівському рудоуправлінні. Для дослідження невибухового руйнування було проведено серію дослідів по вторинному дробленню. Корисними копалинами родовища є інтрузивні кристалічні породи, представлені гранітоїдами (граніт порфіроподібний, лужний граніт, апліт рожевий) серед яких зустрічаються дайки лампрофіру.

Межа міцності при стисканні у водонасиченому стані по 8 пробах становить 528-984, середнє значення – 797 кг/см^2. Результати випробувань наведено у табл. 1.

Табл. 1. Результати випробувань гранітоїдів

Показник	Номер проби							
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
Об'ємна вага	2,9	2,6	2,85	2,69	43	2,6	3	2,72
Питома вага	2,9	2,66	2,89	2,74	29	2,64	2,04	2,78
Пористість	2,9	0,4	4,6	1,5	29	0,69	6,6	2,2
Водопоглинання	0,51	0,1	0,5	0,2	0,50	0,08	1,18	0,21
Спротив удару на копрі	51	50	168	58				
Знос в барабані Деваля					45	2	6,1	4,18
Наявність NO_2SO_4 (втрата у вазі, %)					42	0,08	3,6	0,71
Межа міцності при стиску, кг/см^2								
- у повітряносухому стані	8	580	1098	881	43	580,8	1634,2	907,89
- у водонасиченому стані	8	528	984	797	43	508	1196,8	818,59
- після дослідження на сохранність					43	500,6	1278,4	818,59
- після 100 циклів заморожування	4	526	862	704				
- після 50 циклів заморожування	8	443	952	781				
Коефіцієнт пом'якшення	8	0,88	0,98	0,94	43	0,7	1,13	0,91
Морозостійкість - кількість циклів заморожування	12	50	100	витр им.				
Коефіцієнт морозостійкості	12	0,82	0,98	0,89				

В якості робочого агенту застосовувався модифікований НРС, що містить безводний карбонат натрію 4 мас. %, сульфітно-дрожжеву барду 1 мас. %, натрієву сіль продукту конденсації нафталінсульфокислоти та формальдегіду 1 мас. %, хлорид натрію 2 мас. %, поліоксихлорид алюмінію 2 мас. %, оксид кальцію 90 мас. %. Розрахунок відстані між шпурами проводили за формулою, що визначає довжину тріщин, яка отримана з використанням енергетичного критерію Гріффітса і обумовлена повільно зростаючим навантаженням розтягуючих напружень всередині шпуру під дією НРС. Протяжність тріщини залежить від діаметра шпуру, модуля пружності НРС і параметрів гірської породи $E_м$, k_{Ic}, $P(t^*)$:

$$L_{тр} = \frac{P^2(t^*) r_0^2 E_м}{2(k_{Ic})^2 E_{НРС}} \qquad (1)$$

де: $P(t^*)$ - напруження, що развиває НРС в шпурі, приймаються рівними тиску розширення через заданий час t^* руйнування об'єкта [6], МПа;

2 - числовий коефіцієнт перетворень енергетичного критерія Гріффітса;

r_0^2 - радіус шпура, м.

$E_м$ - модуль пружності матеріала, що руйнується, МПа;

$E_{НРС}$ - модуль пружності НРС, МПа;

k_{Ic} - коефіцієнт інтенсивності напружень матеріала, що руйнується, МПа, ($\sqrt{м}$).

Контролювались такі параметри: температура суміші в шпурі, час руйнування негабариту. Результати характерних експериментів наведені нижче.

Для першого досліду було обрано блок (рис. 4) розмірами 950х650х900 мм, у якому було пробурено шпури з відстанню між ними 0,3 м. Температура навколишнього середовища становила 23-27°С, температура суміші в процесі гідратації становила 20-25°С.

Руйнування негабариту відбулося через 6 годин. Гранітний блок був зруйнований симетрично на дві великі частини по лінії шпурів і дві маленькі частини поперек лінії шпурів.

а б в)

Рис. 4. Вимірювання температури НРС в шпурі (а) і загальний вигляд гранітного блоку з відстанню між шпурами 0,3 м після заливки НРС (б) та після руйнування (в).

У другому досліді було взято негабарит розмірами 1200х1000х550 мм. Відстань між шпурами дорівнювала 0,5 м. Температура навколишнього середовища становила 23-27°С, температура суміші в процесі гідратації становила 22-26°С. Через 8 годин від блоку почала відколюватися частина, при цьому тріщина пройшла по лінії шпурів.

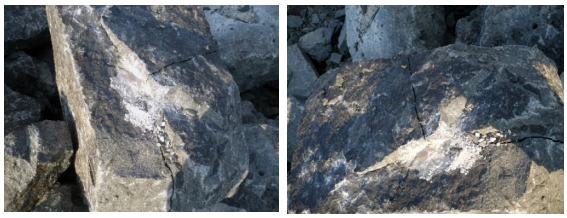
Третій дослід було проведено на негабаритному блоці розмірами 1300х800х650 мм. Відстань між шпурами дорівнювала 0,65 м. Температура

навколишнього середовища протягом експерименту становила 25-36°С, температура суміші в процесі гідратації становила 22-33°С.

а) б)

Рис. 5. Загальний вигляд гранітного блоку з відстанню між шпурами 0,5 м до руйнування (а) та після руйнування (б).

Через 6 годин блок почав тріскатись, одночасно з цим, частина суміші, що знаходилась поряд з устям шпуру почала перетворюватись на порошок, і відбулось вишпарювання суміші з приустьової частини шпуру глибиною до 5 см (рис. 6). Через неконтрольований процес гідратації тріщини розкрились на невелику ширину (до 1 см).



а) б)

Рис. 6. Загальний вигляд гранітного блоку (а) і пришпурової області (б) після руйнування з частковим вишпурюванням

Четвертий дослід є характерним прикладом неконтрольованої гідратації. В негабаритному блоці розмірами 700х500х450 мм було пробурено один шпур. Температура навколишнього середовища протягом експерименту становила 27-38°С, температура суміші в процесі гідратації становила 29-39°С. Через 2 години після заливки температура суміші досягла 39°С і протягом декількох хвилин підвищилась до 100°С. Після цього відбулось декілька викидів порошкоподібного НРС з рясним виділенням пари. НРС, що залишився в шпурі, також гідратував у вільному об’ємі, внаслідок чого в шпурі залишилися порошкоподібні рештки (рис. 7). Руйнування блоку не відбулось.

Рис. 7. Загальний вигляд гранітного блоку після вишпурювання НРС без руйнування граніту

Висновки.

Таким чином, проведені експерименти підтвердили отримані в лабораторних умовах результати, щодо впливу температури на ефективність руйнування. Загальний висновок можна сформулювати наступним чином. Підвищення температури призводить до прискорення швидкості гідратації невибухових руйнуючих сумішей і може скоротити час руйнування вдвічі. Однак у випадку неконтрольованого росту температури зростає ризик вишпурювання суміші і зниження ефективності руйнування від зменшення розміру тріщин до відсутності руйнації. Критичною температурою, в польовому експерименті стала температура 39 градусів. Проведені дослідження дозволяють зрозуміти особливості невибухового руйнування в натурних умовах при коливанні температури, що створює основу для проєктування технології невибухового руйнування гірських порід.

Список літератури

1. Ahmed Elbeih, Tamer Elshenawy, Hany Amin, Ahmed K. Hussein and Sara M. Hammad- Preparation and Characterization of a New High-Performance Plastic Explosive inComparison with Traditional Types, International Journal of Chemical Engineering 2019(2019) 1-6.

2. Young C. Controlled-foam injection for hard rock excavation, in Vail Rocks 1999, The

37th U.S. symposium on rock mechanics (USRMS), 7–9 June,

Vail, Colorado; 1999, June. p. 115–21. 3. Denisart J-P, Barry E, Institut CS. Vaud SLB, Method of breaking a hard compact material, means for carrying out the method and application of the method, 3988037; 1976.

4. Sakhno, I., Sakhno, S. Directional fracturing of rock by soundless chemical demolition agents. Heliyon. 2024. 10(4). e26068.

5. De Graaf WW, Spiteri W. A preliminary qualitative evaluation of a hydraulic splitting cylinder for breaking rock in deep-level mining. J South African Inst Min Metall. 2018;118(8):891–7.

6. Невибухова руйнуюча речовина: ТУ У В.2.7-26.5-24478901- 004:2007. [На заміну ТУ У БВ 2.7.00030937.089397]. Без обмеження терміну дії. – Харьков: Госстандарт. Харьк. центр стандартизации и аэрологии, 2007. – 14 с.

7. Harada T, Soeda K, Idemitsu T, Watanabe A. Characteristics of expansive pressure of an expansive demolition agent and the development of new pressure transducers. Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu/Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. 1993;478: 95–109. https://doi.org/10.2208/jscej.1993.478_91

8. Arshadnejad S, Goshtasbi K, Aghazadeh J. A model to determine hole spacing in the rock fracture process by non-explosive expansion material. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2011;18(5):509–14.
https://doi.org/10.1007/s12613-011-0470-5

9. Natanzi AS, Laefer DF, Connolly L. Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents. Constr Build Mater. 2016;110:117–127.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016

10. De Silva VRS, Ranjith PG, Perera MSA. An alternative to conventional rock fragmentation methods using SCDA: a review. Energies. 2016;9(11):958. https://doi.org/10.3390/en9110958.

References

1. Ahmed, E., Tamer, E., Hany, A., Ahmed, K., Hussein and Sara M. (2019). Hammad- Preparation and Characterization of a New High-Performance Plastic Explosive in Comparison with Traditional Types. *International Journal of Chemical Engineering*, 1-6.

2. Young, C. (1999). Controlled-foam injection for hard rock excavation, in Vail Rocks 1999, The 37th U.S. *Symposium on rock mechanics (USRMS)*, 7–9 June. Vail, Colorado.

3. Denisart, J-P., Barry, E., Institut, CS. Vaud SLB. (1976). *Method of breaking a hard compact material, means for carrying out the method and application of the method*, 3988037.

4. Sakhno, I., Sakhno, S. (2024). Directional fracturing of rock by soundless chemical demolition agents. *Heliyon*, 10(4), e26068.

5. De Graaf WW, Spiteri, W. (2018). A preliminary qualitative evaluation of a hydraulic splitting cylinder for breaking rock in deep-level mining. *J South African Inst Min Metall*, 118(8):891–7.

6. Nevybukhova ruinuiucha rechovyna. (2007). TU U V.2.7-26.5-24478901- 004:2007. Kharkiv: Hosstandart. Kharkivskyi tsentr standartyzatsyy y aerolohyy. [in Russian]

7. Harada. T., Soeda, K., Idemitsu. T., Watanabe. A. (1993). Characteristics of expansive pressure of an expansive demolition agent and the development of new pressure transducers. *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu/Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*. 478: 95–109. https://doi.org/10.2208/jscej.1993.478_91

8. Arshadnejad, S., Goshtasbi, K., Aghazadeh, J. (2011). A model to determine hole spacing in the rock fracture process by non-explosive expansion material. *International Journal of Minerals*, *Metallurgy and Materials*. 18(5):509–14. https://doi.org/10.1007/s12613-011-0470-5

9. Natanzi, AS., Laefer, DF., Connolly, L. (2016). Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents. *Constr Build Mater*., 110:117–127. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016

10. De Silva VRS, Ranjith, PG., Perera, MSA. (2016). An alternative to conventional rock fragmentation methods using SCDA: a review. *Energies*, 9(11):958. https://doi.org/10.3390/en9110958.

Сахно Іван Георгійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гірничої справи, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна
E-mail: ivan.sakhno@mipolytech.education
Сахно Світлана Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої справи, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна
svitlana.sakhno@mipolytech.education
Зуєвська Наталя Валеріївна – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри геоінженерії НН ІЕЕ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», м. Київ, Україна
zuevska@i.ua
Богомаз Ольга Петрівна – phD, доцент, доцент кафедри безпеки праці та охорони довкілля, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна
olha.bohomaz@mipolytech.education
Погосян Арсен Вачаганович – студент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна
arsen.pohosian@mipolytech.education

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE EFFICIENCY OF NON-EXPLOSIVE DESTRUCTION OF ROCKS: CASE STUDY AT GRANITE QUARRY

***Purpose**. Determination of the operating temperature regime of a non-explosive destructive mixture based on calcium oxide in different temperature fields from the range of the spring-summer period, typical for Ukraine.*

***Methodology.** The work used following methods: laboratory modeling, field tests, engineering analysis, synthesis, statistical processing.*

***Findings**. The developed mining industry is an attractive industry for the implementation of SCDA in Ukraine. The main reasons for restraining the widespread implementation of SCDA are their high sensitivity to ambient temperature and a long destruction time, which is due to the long hydration hardening of the mixture. The results of the studies indicate that the time of the onset of hydration and the growth of the volume of structural neoplasms exponentially depend on the temperature of the material containing SCDA. At an ambient temperature of 50°C and more, the SCDA does not operate in the set mode, a sudden increase in temperature and a corresponding increase in the volume of the mixture with uncontrolled expansion are observed. Thus, the upper limit of the operating temperature range of the mixture is 50°C. The critical temperature of granitoids in the field experiment was 39°C. Field experiments confirmed that an increase in temperature leads to an acceleration of the hydration rate of non-explosive destructive mixtures and can reduce the destruction time by half.*

***Originality** consists in establishing the laws of changes in the hydration rate of non-explosive destructive mixtures based on calcium oxide in different temperature fields and environments with different thermal conductivity.*

***Practical implication**. The results of the research can be used in the development of improved mixtures for non-explosive destruction, improving the technology of non-explosive destruction at ambient temperatures above 30°C.*

***Keywords**: soundless chemical demolition agents, rock destruction, quasi-static destruction, borehole, temperature field of rocks.*

Sakhno Ivan – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mining, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhia, Ukraine
E-mail: ivan.sakhno@mipolytech.education
Sakhno Svitlana – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhia, Ukraine
E-mail: svitlana.sakhno@mipolytech.education
Zuievska Natalia – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geoengineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine,
E-mail: zuevska@i.ua,
Bohomaz Olha – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of occupational safety and environmental protection, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhia, Ukraine
E-mail: olha.bohomaz@mipolytech.education
Poghosyan Arsen – Student, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhia, Ukraine
arsen.pohosian@mipolytech.education