

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-82>

УДК 622.236.9, 622.271.2

ЩІПАНОВ ІГОР

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0001-7404-7264>

e-mail: igorshipanov2904@gmail.com

ВОРОБІЙОВ ВІКТОР

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0002-3446-4714>

e-mail: vvv.imit@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАПРАВЛЕНОГО РОЗКОЛУ ПРИ ДОБУВАННІ БЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

У роботі досліджується вплив контрольованого бокового стискання на точність направленої розколу монолітних об'єктів за дії невибухових руйнівних сумішей (НРС). Мета дослідження кількісно оцінити, у яких межах боковий тиск впливає на характер і динаміку руйнування монолітних об'єктів при збільшенні відстані між шпуррами без втрати керованості тріщини відколу. Експериментальна програма включала три серії дослідів на моделях з алебастру Г-4 із різними відстанями між шпуррами. Боковий тиск створювався розподіленим навантаженням за допомогою сконструйованого пристрою, представленого в роботі. Точність відколювання оцінювали за відхиленням фактичної тріщини від запланованої лінії відколювання на семи контрольних відрізках. В роботі експериментально встановлено, що при підвищенні бокового стискання значно збільшується точність тріщини відколювання тим самим оптимізуючи робочий процес та зменшуючи відсоток виходу некондиційної продукції.

Ключові слова: невибухові руйнівні суміші; направлений розкол; бокове стискання; видобуток кам'яних блоків; тріщиноутворення; статичні навантаження.

SHCHIPANOV IHOR, VOROBYOV VICTOR

Kremenchug Mykhailo Ostrogradskyi National University

OPTIMIZATION OF DIRECTIONAL FRACTURING TECHNOLOGY FOR DIMENSION-STONE PRODUCTION

The paper presents an integrated study of controlled directional splitting of monolithic materials driven by soundless chemical demolition agents, in which controlled lateral compression is introduced as an additional governing parameter. We treat the process as a superposition of two fields: the slowly rising expansive pressure inside the borehole, generated by hydration of the mixture, and a quasi-static compressive field uniformly applied to the specimen faces. In this setting, the crack path is dictated not only by local stress concentration near the borehole wall but also by the consistency of boundary conditions with the design splitting plane. The aim is to qualitatively identify ranges in which inter-borehole spacing can be increased without losing crack controllability thanks to moderate lateral compression. The programme is arranged as a parametric study on alabaster prisms; borehole geometry and layout as well as the level of distributed face loading were varied. Baseline drilling parameters were pre-aligned with energy-based criteria for brittle fracture to ensure reproducible initiation. Crack behaviour was assessed by mapping the deviation of the actual split line from the design line along gauge segments. Findings show that even moderate compression planarises the fracture front, suppresses unwanted branching, and reduces edge effects and material heterogeneities. Increasing confinement further stabilises the process, shaping an energetically favourable path within the design plane and broadening the range of rational spacings. A synergy between borehole layout and lateral compression is observed: a suitable choice of diameter, depth, orientation and spacing, combined with uniform pressing, preserves block integrity and improves split surface quality. Practical implications include optimising drilling costs while retaining predictability in vibration- and noise-sensitive environments. Guidance is provided on fixture stiffness, mixture temperature control and loading synchronisation; limitations and a pathway to industrial scaling are outlined.

Keywords: non-explosive demolition agents; directed fracture; lateral compression; dimension stone extraction; crack formation; static loads.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

За рахунок збільшення потреби в якісній блочній продукції, гірничодобувна галузь потребує постійних модернізацій та впроваджень нових технологій, зменшуючи відсоток виходу некондиційної продукції, але враховуючи всі актуальні проблеми, які стають між ефективністю та екологічністю.

Технологія добування блочного каменю категорично відрізняється від процесу відкритої розробки інших твердих корисних копалин де проводиться дроблення породи на заданий гранулометричний склад та забезпечення необхідних параметрів розвалу підірваної гірської маси. При добуванні блочної продукції на спеціалізованих кар'єрах важливою задачею стоїть максимально точно відділити блок від масиву, не утворюючи шкідливого тріщиноутворення, що при подальшій обробці каменю може призвести до дефектів та подальшої незапланованої руйнації, впливаючи на кінцеву вартість.

Враховуючи вище перераховані нюанси, для добування блочної продукції віддають перевагу невибуховим методам руйнації, що мають меншу ефективність ніж вибухові способи, але забезпечують максимально можливу цілісність отриманою продукції. Невибухові методи можливо використовувати в специфічних умовах, наприклад, біля споруд або у випадках, де руйнація повинна пройти локально без

сейсмічного впливу від вибуху. Широко використовуються різні невибухові методи руйнації з великим різноманіттям пристроїв, механізмів та невибухових сумішей. З загальної маси виділяється використання невибухових руйнівних сумішей (НРС), що розміщують в шпур з додаванням води, за рахунок процесу гідратації суміш через певний час починає розширюватись, створюючи необхідний тиск на стінки шпуру для руйнації матеріалу. Головні переваги методу - невелика ціна НРС та низка трудомісткість проведення робіт в порівнянні іншими статичними методами, що загалом впливає на економічний аспект.

Аналіз актуальних досліджень та публікацій

Дослідження в сфері добування блочної продукції потребують постійного адаптування до реалій та актуальних проблем. У цьому контексті доречно систематизувати результати актуальних робіт [1]–[7], де окреслюється, як різні технології та нововведення впливають на керованість та стабільність процесу направленного розколу.

В наведеній роботі [1] авторами Chen T., Vennes I. запропоновано та експериментально обґрунтовано V-подібну схему буріння (V-cut) для безвибухового руйнування порід під біаксіальним стисканням із використанням SCDA(НРС). Показано, що орієнтоване розміщення шпурів під кутом до фронту виробки формує стабільну головну тріщину без залишкових тріщин. Робота підкреслює паритетну важливість схеми шпурів і параметрів НРС для досягнення спрямованого розколу. Zhao X.-L., Huang B.-X. [2] досліджують закономірності спрямованого розколу за дії НРС, використовуючи щільні лінійні мульти-шпурові схеми. За даними деформаційних вимірів та акустичної емісії виділяються поетапні стадії процесу утворення та розповсюдження тріщин, а також зазначається, що густина лінійної сітки та величина міжшпурового кроку визначають стабільність процесу відколювання. Оптимізуючи процес направленного руйнування породи з використанням НРС, Щіпанов І., Воробйов В. [3] досліджують, як саме вплине зміна параметрів вільного шпуру на точність та направлення тріщини відколювання, зберігаючи цілісність блоку і підвищуючи вихід кондиційної продукції. На прикладі підземних виробок, Nabib K.-M., Shnorhokian S. [4] демонструють практичну застосовність НРС там, де вибухові технології обмежені. Синхронізація схеми буріння зі швидкістю твердіння суміші забезпечує відтворюваний спрямований розкол навіть за складних гірничо-геологічних умов та просторових обмежень. Shang J. та Zhao Z. [5] проводять аналіз напружено-деформованого стану у приствольній зоні шпуру під дією НРС, де встановлюють локалізацію максимумів кільцевих (тангенціальних) напружень біля стінок шпуру. Це визначає місце зародження і початковий напрям росту тріщини відколу, слугуючи фізичною основою для верифікованих моделей прогнозу спрямованого руйнування з урахуванням геометрії шпурів і властивостей породи. Zhang Q., He M. C. [6] розвивають метод подвійного шпуру з ефектом накладання полів напружень, що створює просторово концентровану зону руйнування в проектній площині. Зафіксовано приріст довжини та стійкості фронту тріщини в щільних масивах, що напряду підвищує точність відокремлення і вихід блочної продукції. Natanzi A. S., Laefer D. F. [7] кількісно встановили температурну чутливість SCDA(НРС) Bristar та Dexpan: у діапазоні 2–19 °C зі зростанням температури прискорюється початок утворення тиску, а об'ємне розширення зростає пропорційно зі збільшенням температур.

Огляд актуальних досліджень засвідчує спільну методологію: керований розкол з використанням НРС досягається через комплексну оптимізацію параметрів і схем розташування шпурів, реології НРС та зовнішніх умов.

Водночас загальний вплив навантажень на об'єкт руйнування під час ініціювання та розвитку тріщини відколювання висвітлюється фрагментарно. У представленій роботі досліджується, як мінімізувати шкідливе тріщиноутворення та напруження в об'єкті руйнування за рахунок попереднього бокового стискання, підвищуючи точність і якість тріщини відколу.

Формулювання цілей статті

Метою представленої роботи є: вивчення впливу бокового стискання на характер і динаміку руйнування монолітних об'єктів, бетонних конструкцій, тощо, при застосуванні невибухових руйнівних сумішей.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставлених цілей у представленій роботі було проведено три серії дослідів, де при різних умовах проводилась руйнація моделей за допомогою НРС. Також було виконано низку розрахунків, що потрібні для коректного проведення запланованих експериментів, які включають: розрахунок оптимальної відстані між шпурами для моделей з алебаstrу, що використовуються в експериментах; розрахунок, що встановлює жорсткість пружин, завдяки якому стає можливим точне прикладення сили стискання моделей, які руйнують.

Моделі виготовлялись з алебаstrу Г-4 (з вмістом води 0,7л на 1кг алебаstrу) розміри яких складають: 300мм – довжина; 180мм – ширина; 40 мм – товщина.

Шпури розташовували (просвердлювали) по довжині моделі рівновіддалено від центру. Розрахунок оптимальної відстані між шпурами здійснюється за формулою, що визначає теоретичну довжину тріщини, отриманої з використанням енергетичного критерію Гріффітса [8]:

$$a = \frac{k_p \cdot (P(t))^2 \cdot r_n^2 \cdot E_m}{2 \cdot k_c \cdot E_{НРС}};$$

k_p – коефіцієнт концентрації напружень на стінках шпуру (приймаємо $\approx 2,7$, стандарт для гіпсових матеріалів);

$P(t)$ – тиск НРС у шпурі, (приймаємо 15 МПа);

r_n – радіус шпуру ($r_n = 5\text{мм} = 0,005\text{мм}$);

E_m – модуль пружності алебаstrу Г-4 (≈ 2000 МПа);

k_c – коефіцієнт інтенсивності напружень (приймаємо 0,2 МПа);

E_{HPC} – модуль пружності НРС (приймаємо ≈ 1500 МПа);

$$a = \frac{2,7 \cdot (15)^2 \cdot (0,005)^2 \cdot 2000}{2 \cdot 0,2 \cdot 1500} = \frac{30,375}{600} = 0,0506 \text{ м} = 50,6 \text{ мм}.$$

Після проведених розрахунків беремо відстань 50 мм як базову точку для проведення дослідів.

В дослідженнях, де використовується бокове стиснення, щоб визначити його вплив на процес руйнування моделі, потрібна точність прикладених зусиль, враховуючи це були виконанні розрахунки за результатами яких встановлено жорсткість пружин і обрана сила стиснення 50 Н та 200 Н для різних серій експериментів.

Для визначення жорсткості пружин був проведений експеримент, де на 4 пружини рівномірно прикладалась вага, що складала 3 кг (довжина пружин без навантаження складає 22,5 мм).

Довжина пружин під навантаженням:

$$\Delta x = 22,5 - 21,6 = 0,9 \text{ мм} = 0,0009 \text{ м}.$$

Прикладена сила на пружини для встановлення жорсткості:

$$F = m \cdot g = 3 \cdot 9,81 = 29,43 \text{ Н}.$$

Прикладена сила на одну пружину:

$$F_1 = \frac{29,43}{4} = 7,35 \text{ Н}.$$

Жорсткість однієї пружини:

$$k = \frac{F_1}{\Delta x} = \frac{7,35}{0,0009} = 8166 \text{ Н/м}.$$

Подальша задача - обчислити, наскільки потрібно стиснути пружини, щоб загальне зусилля стиснення становило 50 Н та 200 Н.

Розрахунок для 50 Н.

Сила на одну пружину:

$$F_1 = \frac{F_{\text{заг}}}{n} = \frac{50}{4} = 12,5 \text{ Н}.$$

Стиснення однієї пружини:

$$x = \frac{F_1}{k} = \frac{12,5}{8166} = 0,0015 \text{ м} = 1,5 \text{ мм}.$$

Розрахунок для 200 Н.

Сила на одну пружину:

$$F_1 = \frac{F_{\text{заг}}}{n} = \frac{200}{4} = 50 \text{ Н}.$$

Стиснення однієї пружини:

$$x = \frac{F_1}{k} = \frac{50}{8166} = 0,0061 \text{ м} = 6,1 \text{ мм}.$$

Виходячи з розрахунків для досягнення сили стиснення 50 та 200 Н, пружини потрібно стиснути на 1,5 мм та 6,1 мм відповідно.

Щоб створити боковий стиск, було сконструйовано пристрій, який створює розподілене навантаження на бокові грані моделі, конструкція якого представлена на рис. 1 та рис. 2. Позначення на рис.1 та рис.2: 1 – пружина; 2 – шайба; 3 – гайка; 4 – шпилька; 5 – модель що руйнується; 6 – шпуре з НРС; 7 – панель для розподілення тиску.

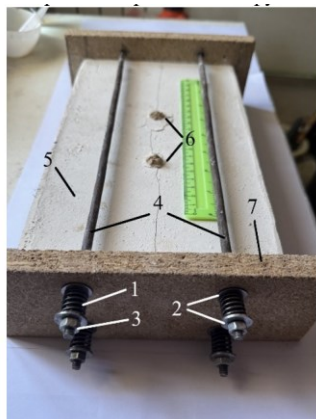


Рис.1. Пристрій для створення тиску
(панель з пружинами)

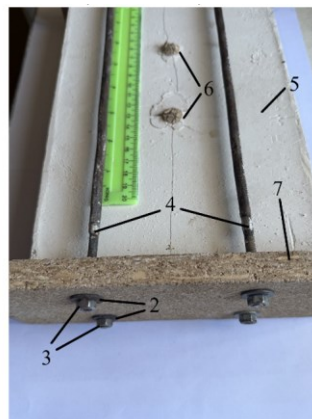


Рис.2. Пристрій для створення тиску
(панель з заглушками)

Процес руйнації моделі із застосуванням пристрою проходить наступним чином: в моделі (5) пробурюються наскрізні шпуре (6) по ширині моделі рівновіддалено від центру; модель встановлюється та центрується в пристрій; після чого виконується бокове стиснення моделі за допомогою пружин (1), які притискають до платформи (7) за допомогою прокручування гайок (3, рис.1) на прораховану величину, тим самим створюючи точно задану силу стиску; після встановлення моделі та повної фіксації в пристрій,

виконують завантаження НРС в шпури; через певний час НРС створює на стінках шпуру критичні навантаження, яких достатньо для направленої руйнування моделі.

Маючи данні оптимальної відстані між шпурами, сконструйований пристрій для створення тиску та отримані розрахунки по жорсткості пружин, стає можливим розпочинати експериментальну частину запланованої роботи.

Експериментальна програма була структурована у вигляді трьох серій дослідів, спрямованих на дослідження впливу відстані між шпурами на ефективність руйнування з використанням НРС за умов різного бокового тиску.

У першій серії відстань між шпурами становила – 50 мм, у другій – 70 мм, у третій – 100 мм. Кожна серія включала три експерименти із варіантами прикладеного бокового стиснення: 0 Н, 50 Н та 200 Н, яке було рівномірно розподілено по боковій грані за допомогою сконструйованого пристрою (див. рис.1 та рис.2).

Після проведення кожного експерименту виконувались заміри відхилень тріщини від запланованої лінії відколювання. Заміри проводили на семи відрізках позначених на рисунках, що занесені до таблиці 4. Отримані результати кожної серії дослідів були занесені до таблиць 1, 2 та 3 відповідно.

Таблиця 1

Результати першої серії дослідів, відстань між центрами робочих шпурів становить 50мм.

Точки замірів	Величина відхилення, мм					
	Експеримент без тиску моделі		Експеримент зі стиском 50Н		Експеримент зі стиском 200Н	
	- ΔL	+ ΔL	- ΔL	+ ΔL	- ΔL	+ ΔL
1	0	27	13	0	3	0
2	16	10	6	0	2	0
3	2	2	0	5	0	1
4	0	0	0	4	0	0
5	2	4	0	2	0	1
6	0	7	2	0	0	5
7	0	15	4	0	0	6
Максимальні відхилення	16	27	13	5	3	6
Загалом	85		36		18	

Таблиця 2

Результати другої серії дослідів, відстань між центрами робочих шпурів становить 70 мм.

Точки замірів	Величина відхилення, мм					
	Експеримент без тиску моделі		Експеримент зі стиском 50Н		Експеримент зі стиском 200Н	
	- ΔL	+ ΔL	- ΔL	+ ΔL	- ΔL	+ ΔL
1	0	6	3	0	0	6
2	0	3	2	0	0	3
3	0	8	6	0	0	0
4	0	9	11	0	0	0
5	0	4	10	0	0	0
6	0	16	0	1	2	0
7	0	33	0	3	4	0
Максимальні відхилення	0	33	11	3	4	6
Загалом	79		36		15	

Таблиця 3

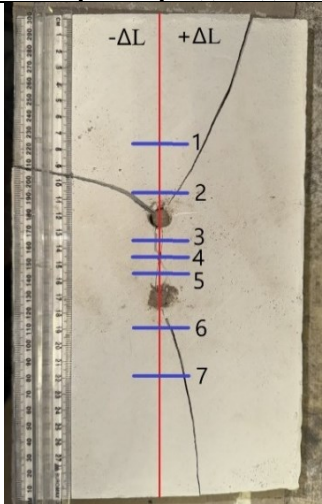
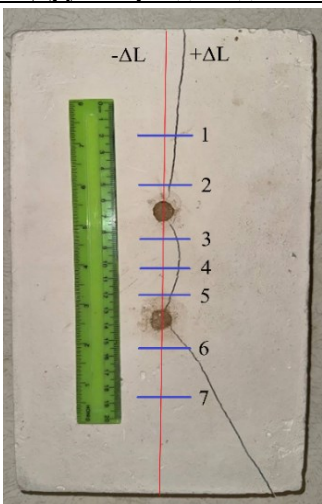
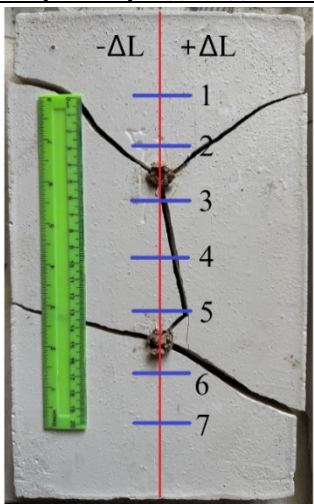
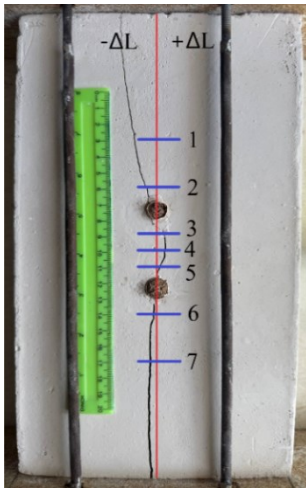
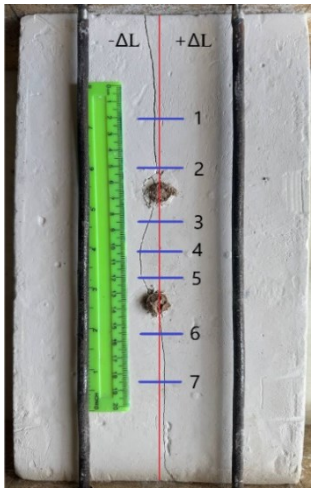
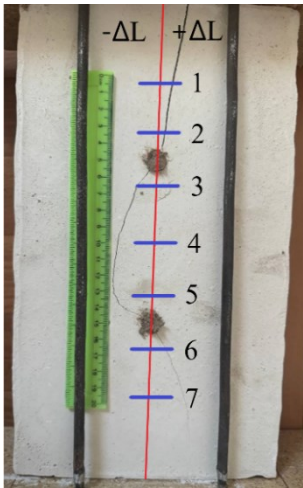
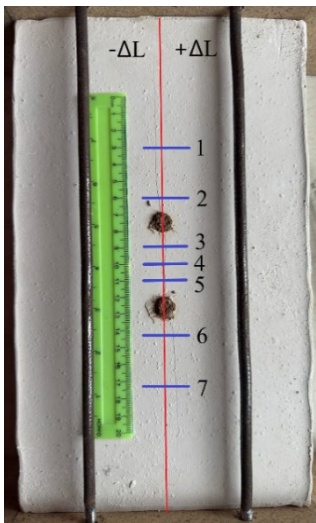
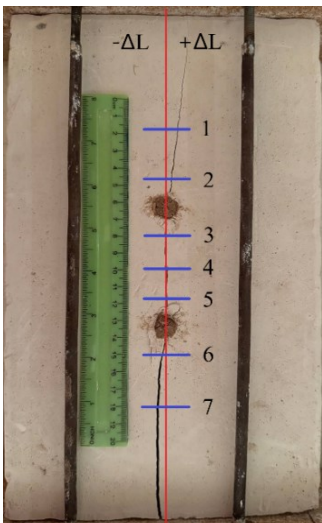
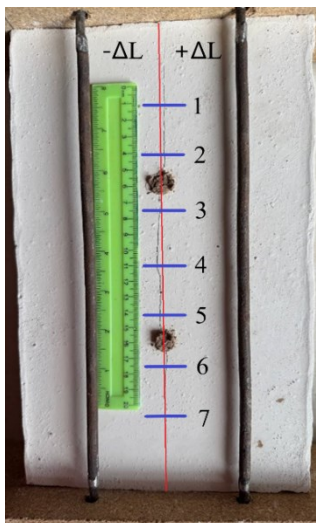
Результати третьої серії дослідів відстань між центрами робочих шпурів становить 100 мм.

Точки замірів	Величина відхилення, мм					
	Експеримент без тиску моделі		Експеримент зі стиском 50Н		Експеримент зі стиском 200Н	
	- ΔL	+ ΔL	- ΔL	+ ΔL	- ΔL	+ ΔL
1	50	80	0	7	0	2
2	23	25	0	3	0	2
3	0	2	12	0	1	0
4	0	8	22	0	4	0
5	75	14	22	0	2	0
6	0	39	0	10	0	1
7	n/a	n/a	0	23	0	0
Максимальні відхилення	75	80	22	23	4	2
Загалом	316		99		12	

Зазначимо, що представлені експерименти були проведені на модельному (лабораторному) матеріалі, тому для точнішого підтвердження отриманих результатів необхідне подальше дослідження з використанням промислових зразків.

Таблиця 4

Фото-звіт отриманих результатів

	Відстань між центрами шпурів 50мм. Перша серія дослідів	Відстань між центрами шпурів 70мм. Друга серія дослідів	Відстань між центрами шпурів 100мм. Третя серія дослідів
Модель без стиску			
Боковий стиск складає 50Н			
Боковий стиск складає 200Н			

Позначення на рисунках з таблиці 4:

- 1) Червона лінія – запланована лінія відколювання
- 2) Сині відрізки – позначки на моделі на яких виконувались заміри відхилення
- 3) $-\Delta L$ та $+\Delta L$ – відхилення тріщини відносно лінії запланованого відколювання

Висновки

1. Проведені серії дослідів показали, що запропонований метод бокового стиснення під час направленої руйнації моделей при використанні НРС має значний вплив на точність лінії відколювання в порівнянні з експериментами з нульовим боковим стисненням моделі.

2. Експерименти показали, що бокове стиснення має значний вплив на лінію відколювання навіть при збільшенні відстані між шпурами від базової в 2 та 3 серії дослідів на 40% та 100% відповідно.

3. Експериментально встановлено, що боковий стиск на 50Н позитивно впливає на точність лінії відколювання, виходячи з отриманих даних можна констатувати: загальне відхилення від запланованого напрямку відколювання при базовій відстані між шпурами (50мм) виходить на 57,6% менше ніж без бокового стиску, а максимальні відхилення зменшуються на 58,1%; при збільшенні відстані між шпурами на 40% до 70мм отримані результати дослідів показали, що загальне відхилення зменшилось на 54,4%, максимальні відхилення зменшились на 57,5%; при збільшенні відстані між шпурами на 100% від базової до 100 мм, загальне відхилення зменшилось на 68,6%, максимальні відхилення зменшились на 70,9%

4. Експериментально встановлено, що збільшення бокового стиску до 200Н, значно впливає на характер руйнування та точність лінії відколювання, а саме: при базовій відстані між шпурами (50мм) загальне відхилення зменшується 50% ніж при стиканні на 50 Н, максимальні відхилення також зменшились на 50%; при збільшенні відстані між шпурами на 40% до 70мм, загальне відхилення зменшилось на 58,3% ніж при стиканні на 50 Н, максимальні відхилення зменшились на 28,5%; при збільшенні відстані між шпурами на 100% від базової до 100мм загальне відхилення зменшилось на 87,8 % ніж при стиканні на 50 Н, а максимальні відхилення зменшились на 85,6%.

5. За рахунок бокового стискання стає можливим збільшення відстані між шпурами більше базової, без втрати ефективності та точності відколювання. Загалом використання представленого методу має вагомий вплив на якість отриманої продукції, також зменшується вплив крайових ефектів та внутрішніх дефектів об'єкту руйнування на напрямки тріщини відколювання.

В подальших дослідженнях можна сфокусуватись на поглибленому аналізі впливу бокового стиснення на процеси утворення та розповсюдження тріщин. Рекомендується підтвердити отримані результати на промислових зразках, так як досліді проводились на модельному матеріалі.

Література

1. Chen T. Vennes I.A novel V-cut method for explosive-free breakage of biaxially loaded rock using soundless chemical demolition agents // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2024. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.12.014.
2. Zhao X.-L.; Huang B.-X.; Cheng Q.-Y.; Wang C.-W.; Chen S.-L. Experimental investigation on basic law of rock directional fracturing with static expansive agent controlled by dense linear multi-boreholes // *Journal of Central South University*. – 2021. – Т. 28. – С. 2499–2513. – DOI: 10.1007/s11771-021-4782-y.
3. Щіпанов І.; Воробйов В. Управління рухом тріщини при використанні невибухових руйнуючих сумішей // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2024. – № 2. – С. 42–50. – DOI: [10.31891/2307-5732-2024-341-5-37](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-37).
4. Habib K.-M.; Shnorhokian S.; Mitri H. Evaluating the application of rock breakage without explosives for underground excavation // *Minerals*. – 2022. – Т. 12, № 2. – Ст. 220. – DOI: 10.3390/min12020220.
5. Shang J.; Zhao Z.; Aliyu M. M. Stresses induced by a demolition agent in non-explosive rock fracturing // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2018. – DOI: [10.1016/j.ijrmms.2018.04.049](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.049).
6. Zhang Q.; He M. C.; Guo S.; та ін. Double-Borehole Superimposed Effect of a New Non-Explosive Directional Rock-Breaking Method // *Applied Sciences*. – 2025. – Т. 15, № 12. – Ст. 6805. – DOI: 10.3390/app15126805.
7. Natanzi A. S.; Laefer D. F.; Connolly L. Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Т. 110. – С. 117–127. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016.
8. Griffith, A. A. *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1921. Vol. 221. P. 163–198. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006
9. Воробйов В. В., Щіпанов І. А. Оптимізація технологічного процесу добування блочного каменю невибуховими руйнівними сумішами // *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства* : матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (Кременчук, 25 квіт. 2024 р.). — Кременчук, 2024. — С. 99–100. DOI: 10.32782/2222-5099.2024.4.17
10. De Silva R. V.; Pathegama Gamage R.; Anne Perera M. S. An Alternative to Conventional Rock Fragmentation Methods Using SCDA: A Review // *Energies*. – 2016. – Т. 9, № 11. – Ст. 958. – DOI: 10.3390/en9110958.

11. Arshadnejad Sh.; Goshtasbi K. Analysis of the radial and tangential stress distribution between two neighbouring circular holes under internal pressure by numerical modelling // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2011. – T. 111, № 5. – С. 301–308. [Електронний ресурс]. – http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532011001700001

12. Шчіпанов І. А.; Воробйов В. В. Дослідження технологічних параметрів при направленому відколюванні породи невибуховими руйнуючими сумішами // *Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства*. матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (Кременчук, 25 квіт. 2025 р.). — Кременчук, 2025. DOI: 10.32782/2079-5009.krnu25.4.17.

References

1. Chen T. Vennes I.A novel V-cut method for explosive-free breakage of biaxially loaded rock using soundless chemical demolition agents // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2024. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.12.014.
2. Zhao X.-L.; Huang B.-X.; Cheng Q.-Y.; Wang C.-W.; Chen S.-L. Experimental investigation on basic law of rock directional fracturing with static expansive agent controlled by dense linear multi-boreholes // *Journal of Central South University*. – 2021. – T. 28. – S. 2499–2513. – DOI: 10.1007/s11771-021-4782-y.
3. Shchipanov I.; Vorobiov V. Upravlinnia rukhom trishchyny pry vykorystanni nevybukhovoykh ruiniuchykh sumishei // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2024. – № 2. – С. 42–50. – DOI: 10.31891/2307-5732-2024-341-5-37.
4. Habib K.-M.; Shnorhokian S.; Mitri H. Evaluating the application of rock breakage without explosives for underground excavation // *Minerals*. – 2022. – T. 12, № 2. – St. 220. – DOI: 10.3390/min12020220.
5. Shang J.; Zhao Z.; Aliyu M. M. Stresses induced by a demolition agent in non-explosive rock fracturing // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2018. – DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.049.
6. Zhang Q.; He M. C.; Guo S.; et al. Double-Borehole Superimposed Effect of a New Non-Explosive Directional Rock-Breaking Method // *Applied Sciences*. – 2025. – T. 15, № 12. – St. 6805. – DOI: 10.3390/app15126805.
7. Natanzi A. S.; Laefer D. F.; Connolly L. Cold and moderate ambient temperatures effects on expansive pressure development in soundless chemical demolition agents // *Construction and Building Materials*. – 2016. – T. 110. – S. 117–127. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.016.
8. Griffith, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1921. Vol. 221. P. 163–198. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006
9. Vorobiov V. V., Shchipanov I. A. Optymizatsiia tekhnolohichnoho protsesu dobuyannia blochnoho kameniu nevybukhovymy ruiniivnymy sumishamy // *Aktualni problemy zhyttiedialnosti suspilstva : materialy Mizhnar. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh* (Kremenchuk, 25 kvit. 2024 r.). — Kremenchuk, 2024. — S. 99–100. DOI: 10.32782/2222-5099.2024.4.17
10. De Silva R. V.; Pathegama Gamage R.; Anne Perera M. S. An Alternative to Conventional Rock Fragmentation Methods Using SCDA: A Review // *Energies*. – 2016. – T. 9, № 11. – St. 958. – DOI: 10.3390/en9110958.
11. Arshadnejad Sh.; Goshtasbi K. Analysis of the radial and tangential stress distribution between two neighbouring circular holes under internal pressure by numerical modelling // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2011. – T. 111, № 5. – С. 301–308. [Електронний ресурс]. – http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532011001700001
12. Shchipanov I. A.; Vorobiov V. V. Doslidzhennia tekhnolohichnykh parametriv pry napravlenomu vidkoliuvanni porody nevybukhovymy ruiniuchyymi sumishamy // *Aktualni problemy zhyttiedialnosti suspilstva. materialy Mizhnar. nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh* (Kremenchuk, 25 kvit. 2025 r.). — Kremenchuk, 2025. DOI: 10.32782/2079-5009.krnu25.4.17.