

СОЛОВЕЙ АНДРІЙ

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0002-4593-702X>e-mail: andre37gv8@gmail.com

ЩІПАНОВ ІГОР

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

<https://orcid.org/0000-0001-7404-7264>e-mail: igorshipanov2904@gmail.com

ПАРАМЕТРИ НАПРАВЛЕНОГО РОЗКОЛУ ГІРСЬКИХ ПОРІД ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕВИБУХОВИХ РУЙНУЮЧИХ СУМІШЕЙ (НРС)

В роботі досліджені та описані параметри направленої розколу гірських порід при статичних навантаженнях породи за допомогою невибухових руйнуючих сумішей. Досліджений вплив параметрів невибухових речовин, технологічних показників та характеристик самої породи.

Ключові слова: направлений розкол, тріщиноутворення, невибухові руйнуючі суміші, НРС, тиск НРС, температура породи, діаметршпурів, анізотропія, ортотропія, ізотропія, пластини-вставки.

SOLOVEI ANDRII, SCHIPANOV IGOR

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

PARAMETERS OF DIRECTED SPLITTING OF ROCKS USING NON-EXPLOSIVE DESTRUCTIVE MIXTURES (NEDM)

Efficient extraction of stone products at enterprises is possible under the condition of high-quality separation of monoliths with less loss of raw materials. Stone blocks should be divided into more or less structural levels. It is worth specifying the specific direction of division. For this, non-explosive destructive mixtures (NeDM) are used in mining practice. It is essential to understand what influence the massif characteristics have on the rock. The article states at which temperatures of the mountain massif non-explosive mixtures can be used, and when it is inappropriate. The material considers why it is necessary to take into account the anisotropic and orthotropic properties of the stone and, ultimately, what should be the optimal diameter of the holes and the time of chemical reactions in them. In addition, questions regarding the parameters of the non-explosive mixtures themselves are highlighted. Namely, what temperature of water to use for preparing NeDM and mixing it with other components. We are talking about what the pressure of the working mixture in the holes should be. During this time, the mixture will develop the greatest pressure, and directed splitting will occur. The article examines the dependence of the force of expansion of a non-explosive mixture on the diameter of the hole. The dependence of the expansion force on exposure time and temperature was also considered. We are talking about the pre-compression of the mixture and what is the fluidity of destructive mixtures. Issues of the optimal distance between the holes, and the use of insert plates in the holes, which help to carry out accurate splitting, are highlighted. The ratio of uniform forces that load the walls of the hole is taken into account. It is shown under which conditions the formation of cracks is more likely and along which axes. The paper considers the influence of the anisotropic and orthotropic properties of rocks.

Keywords: directional splitting, cracking, non-explosive destructive mixtures, NeDM, mixtures pressure, rock temperature, hole diameters, anisotropy, orthotropy, isotropy, and insert plates.

Постановка проблеми

Отримання блочного каменю на сучасних видобувних підприємствах ще доволі часто відбувається завдяки вибуховим методам руйнування. Руйнування гірських порід вибухом відбувається зі значним негативним впливом на екологію, а також створює великі вібрації та шум, що в сучасних воєнних умовах України є гостро відчутним для громадян. Окрім того, вибухові відділення монолітів від масиву не дозволяють керувати напрямом розколу породи та задавати такий напрям. Саме тому вже понад 30 років промислові підприємства використовують невибухові руйнуючі суміші (надалі «НРС»), які вирішують наступні цілі: гарантують кероване та направлене тріщиноутворення, а також забезпечують попереднє стиснення суміші у шпурах, що підвищує ефективність роботи НРС.

Проте перед початком бурових робіт важливо вичерпно дослідити ряд параметрів, які безпосередньо впливають на якість направленої розколу. При цьому потрібно враховувати як параметри самих невибухових сумішей, так і характеристики породного масиву, а також параметри технологічного процесу розділення гірської породи.

Аналіз останніх джерел

В роботах [4, 5] досліджується процес керування напрямом розколу і теоретично висвітлюються питання використання вставних пластин з НРС для підвищення точності розколу. Розглядаються методи керування утворенням тріщин в шпурах. При цьому в дослідженні [4] процес направленої розколу з використанням пластин-вставок вдосконалений поворотом пластини навколо осі шпура. Завдяки цьому відстань між шпурами збільшується, що дозволяє зменшити тривалість і обсяг буріння.

Більш пізні дослідження [6, 7] приймають до уваги анізотропні та ортотропні властивості гірської породи, напрямом розміщення пластини у шпурі, а також показують як в необхідному напрямку зароджується тріщина при дії статичних навантажень.

Проте ці та інші матеріали не відображають комплексно більшість параметрів, що мають вплив на направлений розкол, зокрема, такі як час розвитку максимального тиску НРС у шпурах, оптимальна температура води для приготування НРС та температура породного масиву.

Метою роботи є комплексне визначення основних та найбільш впливових параметрів на направлений розкол породи як з боку невибухових руйнуючих сумішей, так і породного масиву разом з технологічними показниками.

Виклад основного матеріалу

В надрах України зосереджені родовища природного каменю, яке видобувається в промислових цілях. Важливо зменшувати втрати кам'яної продукції при відділенні монолітів від масиву. У гірських порід спостерігається природна тріщинуватість. Однак для збереження цілісності монолітів важливо проводити їх керований розкол. В цьому допомагають статичні методи, одним з яких є використання невибухових руйнуючих сумішей (надалі «НРС»). Вивчаючи питання направленого розколу, важливо виконати теоретичні дослідження параметрів керування розколом.

До параметрів невибухових сумішей, що впливають на направлений розкол в гірських породах, відносяться:

1. Тиск робочої суміші НРС.
2. Час розвитку максимального тиску НРС у шпурах.
3. Температура води для приготування НРС.
4. Попереднє стискання НРС перед початком кристалізації.

До параметрів породного масиву віднесемо:

- 1) температуру породного масиву.
- 2) діаметр шпурів та оптимальна відстань між ними.
- 3) анізотропні та ортотропні властивості каменю.

До інших технологічних параметрів входять використання шпурових пластин-вставок та їх оптимальна товщина, співвідношення рівнодіючих сил в шпурі від товщини пластини-вставки та утворення тріщин в породі в заданому напрямку, на що безпосередньо можна вплинути.

Важливим показником використання НРС є те, що порода розколюється не викидаючи тверді чи газоподібні продукти, що є екологічно безпечним, а також те, що НРС працює безшумно. Процедура видобутку полягає в наступному – в об'єкті, який розколюють, бурять шпури. Потім шпури заповнюють невибуховою робочою сумішшю, яку готують завчасно.

Розкол породи відбувається внаслідок хімічних реакцій гірської породи із сумішшю та створюваного НРС тиску. Експерименти показали [1], що максимальний тиск всередині шпура P_{max} напряму залежить від його діаметра і описується функцією параболи (рис. 1).

P_{max} також залежить і від температури породного масиву, а також властивостей НРС та якості її приготування. Наступний рисунок (рис. 2) показує час розвитку P_{max} у шпурах, що складає від 35 до 40 годин [1].

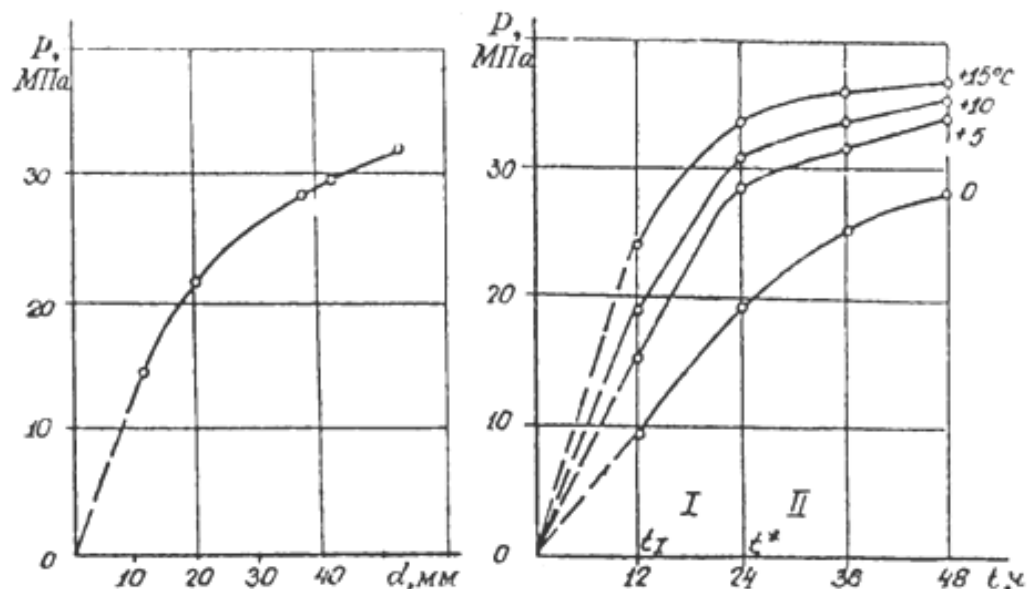


Рис. 1. Залежність розширюючого зусилля НРС від діаметра шпуру (зліва); залежність розширюючого зусилля НРС від часу витримки й температури (справа)

Зазначимо, що температура води, яка використовується для приготування НРС та надалі змішування з робочою сумішшю, має складати на більше 25°C . Чим холоднішою буде вода, тим довше робоча суміш буде текучою. Суміш води з НРС має бути добре текучою. Текучість НРС – це ще один її параметр. Відхилення по витраті води від допустимих меж зменшує розширююче зусилля НРС і знижує його ефективність. Отже, додатковим параметром сумішей в роботі є розширюваність.

Попереднє стискання НРС перед початком кристалізації необхідне для підвищення тиску, який

може розвивати суміш, що дозволяє прискорити технологічний процес руйнування породи.

Варто відзначити, що застосування НРС обмежено показниками температури породного масиву в інтервалі 0- +25°C. Використовувати НРС за температури вище +25°C є небезпечним, оскільки може мати місце самовільний викид суміші зі шпурів. Якщо використовувати НРС в породних масивах за температури нижче +5°C, час його хімічних реакцій і спрацьовування сягне до 2 діб і навіть більше. Тому оптимальними температурними умовами роботи НРС з часом його спрацьовування є 10 годин в межах температурних зон 20±5°C.

Діаметр і глибина шпурів залежать від фізико-технічних характеристик породи, що руйнується. Варто зазначити, що зі збільшенням діаметра шпуру збільшується руйнівне зусилля, і, відповідно, ймовірність холостого вистрілу в шпурі вгору без досягнення необхідного ефекту.

Поширеним і оптимальним діаметром шпурів на гранітних кар'єрах є 40 мм. При цьому для порід середньої міцності рекомендують бурити шпури діаметром 27–42 мм, а краще 32–36 мм.

Відстань між шпурами розраховуємо за формулою:

$$a = \frac{\sigma_p r_0^2 E_m}{2(K_{TC}^2) E_{НРС}} \quad (1)$$

де σ_p – межа міцності породи на розтягування, МПа (дорівнює напрузі сталого розвитку тріщин);

E_m – пружний модуль матеріалу, що руйнується, МПа;

$E_{НРС}$ – пружний модуль НРС, що рівний 10⁴ МПа;

r_0 – радіус шпура, м;

K_{TC} – коефіцієнт тріщиностійкості (інтенсивності напружень), що складає від 0,4 до 1,0 в

залежності від типу породи.

Шпурові агрегати із пластинами-вставками використовуються для підвищення ефективності невибухових руйнівних сумішей (НРС) при видобутку монолітів. Їхнє призначення – забезпечити тріщиноутворення в заданому напрямку. Це відбувається завдяки певному розміщенню пластини-вставки та її конкретній товщині за рахунок перерозподілу напруженого стану на стінки шпура.

В роботі [2] приведений спосіб руйнування гірських порід за допомогою НРС. Суть способу в наступному. Для розміщення складу буряться шпури, суміш НРС готується з водою, а далі розміщується у порожнини патрона НРС. Патрон, в свою чергу, розміщується у шпурі, на стінках якого створюють концентратори розтягуючих напружень, що найменше в одному з діаметральних напрямків шпуру.

Реалізація даного способу з пристроєм дозволяє керувати розподілом напружень навколо шпуру з моменту розширення НРС. Це дозволяє одержати гарантоване спрямоване руйнування об'єктів і підвищує якість руйнування гірських порід.

Однак у даному винаході [2] є й недоліки, а саме:

1. В конструкції патрона можуть відбуватися «вистріли» НРС зі шпурів, що є неприйнятним.
2. Така конструкція унеможливує попереднє стискання НРС до початку кристалізації, що обмежує P_{max} .

В корисній моделі [3] наведена шпурова вставка для направлено розколу монолітів за допомогою невибухових сумішей. Ця вставка з металевою пластиною, до одного торця якої приварена шайба, діаметр однаковий діаметру шпура. З іншого торця пластини приварена шпилька з різьбою, куди може накручуватися друга шайба. Її діаметр також дорівнює діаметру шпура, а на торці виконані два глухих отвори, щоб встановити спеціальний гайковий ключ.

Завдяки вказаним конструктивним елементам в корисній моделі НРС попередньо стискається до початку кристалізації.

Щодо оптимальної товщини пластин-вставок. В роботі [4] запропоновано технологію керування напрямом розколу блочного каменю з використанням пластин-вставок у шпурах з НРС. Діапазон зміни товщини пластин-вставок для шпурів діаметром 40 мм складає 5...10 мм. При цьому враховуються співвідношення σ_x/σ_y , де σ_x – напруження на розтяг вздовж осі x і що виникає на осі y , σ_y – максимальне допустиме напруження на розтяг вздовж осі y і що виникає по осі x .

Для порід без природної тріщинуватості пластини-вставки рекомендуються товщиною 5...6 мм, що забезпечує σ_x/σ_y в межах 0,58...0,73. При розколі породи з середньою природною тріщинуватістю рекомендується використання пластин-вставок товщиною 8 мм із $\sigma_x/\sigma_y = 0,49$. Натомість для порід великої тріщинуватості товщина пластини-вставки складає 10 мм, де $\sigma_x/\sigma_y = 0,42$.

Також в даній праці [4] розраховані епюри розподілення напруг у перетині шпура в момент утворення тріщин для гірських порід, що мають різні механічні властивості. В якості механічних властивостей взяті модуль пружності, межа міцності (МПа) та коефіцієнт Пуассона. А в якості природного каменю брали кварцовий порфір, діабаз та чорний мармур.

Завдяки цим розрахованим епюрам побудований графік залежності співвідношення σ_x/σ_y від товщини пластини-вставки h :

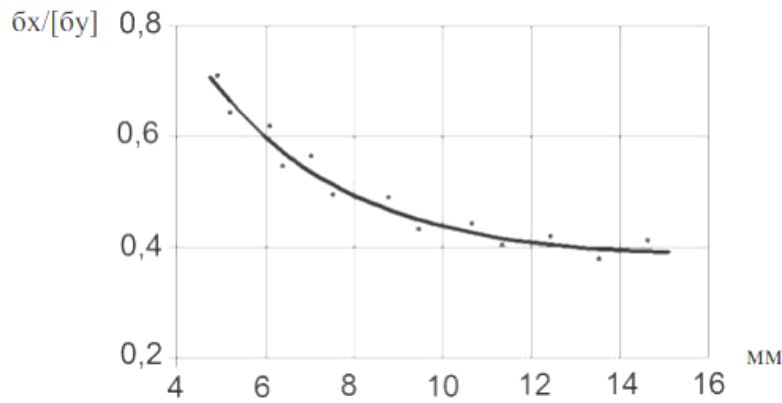


Рис. 2. Залежність співвідношення σ_x/σ_y від товщини пластини-вставки h

Згідно з рисунком, мінімальна товщина пластини-вставки складає 5 мм, що зумовлено P_{max} , який НРС створить у шпурі. Максимальна товщина пластини-вставки складає понад 10 мм. Важливим є те, що пластини-вставки товщиною 12–15 мм значно не змінюють співвідношення σ_x/σ_y , проте зменшують об’єм НРС у шпурах. Останнє погано впливає на ширину тріщини. Механічні властивості породи на співвідношення σ_x/σ_y є несуттєвими.

Функція $\sigma_x/\sigma_y = f(h)$ подібна для всіх порід за умови плоского напруженого стану. Вона має аналітичний вигляд:

$$\sigma_x/\sigma_y = \frac{\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y}{\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y} \quad (2)$$

За більших значень σ_x/σ_y вірогідність утворення тріщин менша, а за менших значень – більша.

Використовуючи пластини-вставки, насамперед важливо проаналізувати співвідношення рівнодіючих сил, що навантажують стінки шпура. Це важливо робити, враховуючи товщину пластини-вставки. Провівши аналіз для пластин-вставок товщиною h від 8 до 14 мм, таке співвідношення встановлено [5]. Діапазон даного співвідношення 1,22 (товщина пластини 8 мм) до 1,44 (пластина товщиною 14 мм). При цьому F_x – місце прикладення рівнодіючої сили по осі x , F_y – місце прикладення рівнодіючої сили по осі y .

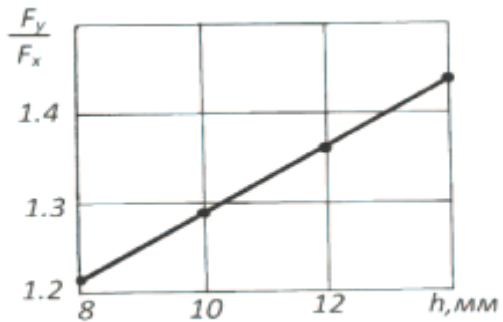


Рис. 3. Залежність співвідношення рівнодіючих сил в шпурі від товщини пластини-вставки

Більше співвідношення рівнодіючих сил підвищує утворення тріщин в породі в заданому напрямку. На противагу, менше співвідношення сил зменшує вірогідність тріщиноутворення.

Важливим фактором при видобутку природного каменю за допомогою НРС є урахування анізотропії породи, тобто залежності властивостей гірських порід (деформаційні, теплові, електричні) від напрямку їх вимірювання. Анізотропія разом із нерівномірним навантаженням стінок шпура диктує технологічні прийоми керування напрямом тріщиноутворення в породі.

Разом із цим зазначимо, що у природних каменів структура кристалічна й тому у них більш чи менш виражені ортотропні властивості, які проявляють себе по осях розташованих під кутом 90° . Ортотропні матеріали мають механічні і теплові властивості, що різняться уздовж трьох перпендикулярних напрямках.

В досліджуваному процесі керування напрямом тріщиноутворення по осях ортотропії x чи y зростаючі розтягуючі напруження змінюються в часі по цих осях [6]. Враховується заданий діапазон зміни ортотропії породи, що складає 0,6 і вище, розміщення пластини-вставки по осях шпура (вертикально чи горизонтально) та заданий діапазон товщини пластини від 5 до 8 мм.

Розглянемо випадок навантаження стінок шпура по осях ортотропії x та y при розміщенні пластини-вставки товщиною 5 та 8 мм по осі x та ортотропії породи 0,6.

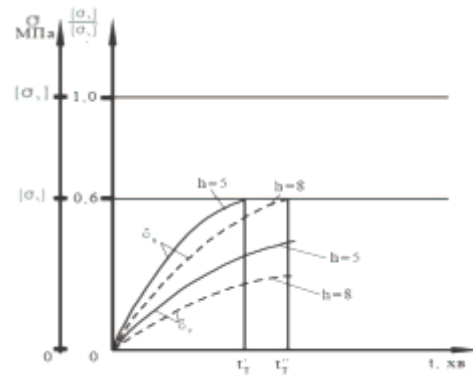


Рис. 4. Зростання розтягуючих напруг на осях ортотропії x та y при кристалізації НРС

Де $[\sigma_x]$ – мінімальна межа міцності з точки зору тріщиноутворення; $[\sigma_y]$ – максимальна межа міцності з точки зору тріщиноутворення; t'_T або t''_T – розтягуючі напруження σ_y по осі y в момент часу; δ – відхилення в утворенні тріщини в залежності від осі та товщини пластини.

Отже, пластини-вставки завтовшки 5–8 мм розміщені на осі ортотропії з мінімальною міцністю забезпечують тріщиноутворення вздовж цієї осі (в даному випадку по осі x) в установленому значенні зміни ортотропії від 0,6 та вище.

Утворення тріщини відколу залежить від величини тиску самонапруженого НРС. Моноліт відколеться, якщо виконається рівність:

$$[\sigma_p] \leq \sum R \quad (3)$$

де $[\sigma_p]$ – сумарна величина статистичної межі міцності породи на розтяг з урахуванням ослаблення площини відколу шпурами та опору зрушенню моноліту, Па;

$\sum R$ – сумарні сили самонапруженого НРС, що викликають відколювання моноліту від масиву, Па.

В роботі [7] для плоскої задачі теорії пружності використовували третю умову міцності. Досліджено процес зародження тріщиноутворення в необхідному напрямку вздовж лінії шпурів при статичних навантаженнях. Одержані результати технологічних параметрів, а саме: тиску, що залежить від радіуса шпуру, товщини пластини-вставки і властивостей породи.

При цьому для дослідження напружено-деформованого стану навколо шпурів використовували модель ізотропного суцільного середовища, а тобто однаковості фізичних властивостей (теплопровідність, електропровідність, пружність тощо) у всіх напрямках.

Напружений і деформований стан за межею пружності визначимо співвідношеннями теорії пластичності. Пластичні матеріали не сприймають напруження, що перевищують певну межу плинності.

Дослідивши вплив пластини-вставки в шпурі з НРС на напружений стан навколо шпуру змогли визначити напрямок розколу каменю. Наявність пластини-вставки відчутно змінює навантаження на крайку шпуру. Змінюється і закон розподілення тиску P по дугах контуру шпуру над пластиною-вставкою. Наближено виразимо його формулою:

$$P = A \left(\frac{\pi R^2}{2} \right) - \frac{h}{2} \sqrt{R_2 - \frac{h^2}{4}} \sin \alpha \quad (0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}) \quad (1.4)$$

де A – коефіцієнт тиску НРС, МПа/мм²;

R – радіус шпуру, мм;

h – товщина пластини-вставки, мм.

Визначаючи залежність величини тиску P від товщини пластин-вставок $h=5-8$ мм для шпурів діаметром 40 мм встановлено, що пластини з більшою товщиною (8 мм), забезпечують більшу вірогідність утворення тріщини в заданому напрямку. Проте вони значно зменшують тиск від НРС. Це негативно впливає на ширину отриманої тріщини в розколотій породі. При $h>8$ мм зусилля НРС може бути недостатнім, щоб розколоти природний камінь.

Висновки

Отже, дослідивши основні параметри, які впливають на направлений розкол тієї чи іншої гірської породи, можна здійснювати більш ефективний, економний та швидкий видобуток кам'яної сировини. Це дозволить кар'єрам якісніше виконувати технологічні завдання, підвищить обсяги якісно видобутої кам'яної продукції, а також зменшить негативний екологічний та шумовий вплив на атмосферу. Відповідно до сучасних воєнних умов в Україні використання невибухових руйнуючих сумішей рекомендується в більшому обсязі на підприємствах та має пріоритетну перспективу застосування або впровадження в технологічний процес розділення гірських масивів.

Література

1. Карасев Ю.Г., Бакка Н.Т. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня : учебное пособие. Санкт-Петербургский горный ин-т, 1997. 428 с.
2. Патент на винахід № 100062, МПК E21C 37/06 (2006.01). Спосіб руйнування гірських порід невибуховими руйнуючими складами й патрон для його реалізації / Сахно І.Г., Касьян М.М. – а 2011 00476, 2012, 7 с.
3. Патент на корисну модель № 92446, МПК E21C 27/14 (2006.01). Шпурова вставка для направлено розколу монолітних об'єктів невибуховими розширюючими сумішами / Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун А.І. – у 2014 04049, 2014, 4 с.
4. Фоменко І.О., Ковтун А.І. Дослідження технологічних параметрів процесу керування напрямком розколу блочного каменю під час використання невибухових руйнуючих сумішей. Національний технічний університет «КПІ». 2014. Випуск 26. 7 с.
5. Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун І.М., Ковтун А.І. Розробка та дослідження процесу керування напрямком розколу блочного каменю при використанні невибухових руйнуючих сумішей. Національний технічний університет «КПІ». 2013. Випуск 2 (12). 8 с.
6. Фоменко І.О., Фоменко О.І., Ковтун І.М., Ковтун А.І. Керування напрямком тріщиноутворення по осях ортотропії гранітів при використанні невибухових руйнуючих сумішей та агрегатів з пластинами-вставками. Національний технічний університет «КПІ». 2015. Випуск 2 (16). 8 с.

7. Кравець В.Г., Стовпник С.М., Ковтун А.І. Теоретичне визначення технологічних параметрів керованого розколу гірської породи невибуховими руйнуючими сумішами. Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 2017. Випуск 2 (20).

References

1. Karasev Yu.G., Bakka N.T. Prirodni kamni. Dobicha blochnogo i stenovogo kamnya : uchebnoe posobie. Sankt-Peterburgskii gornii in-t, 1997. 428 s.
2. Patent na vynakhid № 100062, МПК E21S 37/06 (2006.01). Sposib ruinuвання hirs'kykh porid nevybukhovymy ruiniuuchymy skladamy u patron dlia yoho realizatsii / Sakhno I.H., Kasian M.M. – a 2011 00476, 2012, 7 s.
3. Patent na korysnu model № 92446, МПК E21S 27/14 (2006.01). Shpurova vstavka dlia napravlenoho rozkolu monolitnykh ob'ektiv nevybukhovymy rozshyriiuchymy sumishamy / Fomenko I.O., Fomenko O.I., Kovtun A.I. – u 2014 04049, 2014, 4 s.
4. Fomenko I.O., Kovtun A.I. Doslidzhennia tekhnolohichnykh parametriv protsesu keruvannia napriamkom rozkolu blochnoho kameniu pid chas vykorystannia nevybukhovyykh ruiniuuchykh sumishei. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «KPI». 2014. Vypusk 26. 7 s.
5. Fomenko I.O., Fomenko O.I., Kovtun I.M., Kovtun A.I. Rozrobka ta doslidzhennia protsesu keruvannia napriamkom rozkolu blochnoho kameniu pry vykorystanni nevybukhovyykh ruiniuuchykh sumishei. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «KPI». 2013. Vypusk 2 (12). 8 s.
6. Fomenko I.O., Fomenko O.I., Kovtun I.M., Kovtun A.I. Keruvannia napriamkom trishchynoutvorennia po osiakh ortotropii hranitiv pry vykorystanni nevybukhovyykh ruiniuuchykh sumishei ta ahrehativ z plastynamy-vstavkamy. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «KPI». 2015. Vypusk 2 (16). 8 s.
7. Kravets V.H., Stovpnik S.M., Kovtun A.I. Teoretichne vyznachennia tekhnolohichnykh parametriv kерованого розколу hirs'koi porody nevybukhovymy ruiniuuchymy sumishamy. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «KPI im. Ihoria Sikors'koho». 2017. Vypusk 2 (20).