

© О.О. Шустов<sup>1</sup>, М.М. Кононенко<sup>1</sup>, О.Є. Хоменко<sup>1</sup>, А.В. Косенко<sup>1</sup>, О.В. Черняєва<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БУРОПІДРИВНИХ РОБІТ ДЛЯ РУЙНУВАННЯ МІЦНИХ ПОРІД НА КАР'ЄРАХ З УРАХУВАННЯМ ЗОНИ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ

О. Shustov<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-2738-9891>

М. Kononenko<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1439-1183>

О. Khomenko<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7498-8494>

А. Kosenko<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-3058-4820>

О. Cherniaieva<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0000-5367-6221>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## JUSTIFICATION OF DRILLING AND BLASTING PARAMETERS FOR HARD ROCKS FRAGMENTATION IN OPEN-PIT MINES AND QUARRIES TAKING INTO ACCOUNT THE CRACK FORMATION ZONE

**Мета.** Встановлення величини радіуса зони тріщиноутворення з урахуванням зони непружних деформацій для обґрунтування параметрів буропідривних робіт (БПР) у процесі руйнування міцних порід на кар'єрах.

**Методика дослідження.** Дослідження щодо визначення радіуса зони тріщиноутворення за величиною зони непружних деформацій, внаслідок зміни напружено-деформованого стану масиву гірських порід навколо свердловинного заряду під дією вибуху, виконано чисельне моделювання за допомогою метода скінчених елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation. На основі отриманого радіуса зони тріщиноутворення та класичної гідродинамічної теорії детонації розроблено чисельну модель розрахунку лінії найменшого опору (ЛНО) по підшві уступу. Придатність розробленої моделі підтверджена шляхом порівняння розрахункових значень ЛНО з фактичними даними в умовах реального кар'єру.

**Результати дослідження.** Отримано емпіричну формулу для розрахунку радіуса зони тріщиноутворення в монолітному нетріщинувальному масиві гірських порід на основі результатів чисельного моделювання величини зони непружних деформацій під час підривання свердловинного заряду. Встановлено степеневу залежність величини ЛНО по підшві уступу від діаметра свердловини, щільності та швидкості детонації вибухової речовини, меж міцності порід на розтягання-стискання, а також ступеня їх тріщинуватості. Розбіжність між розрахунковими та фактичними значеннями ЛНО становить від +3 % до -9 %. Запропоновано методика визначення параметрів БПР для руйнування міцних порід на кар'єрах.

**Наукова новизна.** Вперше встановлено степеневу залежність розрахунку ЛНО по підшві уступу від радіуса зони тріщиноутворення, яка комплексно враховує діаметр свердловини, щільність та швидкість детонації ВР, меж міцності порід на розтягання-стискання та їх тріщинуватість, що забезпечує більш точний розрахунок параметрів БПР для руйнування міцних порід на кар'єрах.

**Практичне значення.** Розроблена методика дозволяє визначати раціональні параметри БПР для ефективного руйнування міцних порід на кар'єрах, що сприяє зниженню витрат на підривні роботи.

**Ключові слова:** міцні породи, свердловина, вибухова речовина, зона тріщиноутворення, лінія найменшого опору по підшві уступу.

**Вступ.** У сучасних умовах розвитку гірничовидобувної промисловості, особливо розробки залізрудних родовищ корисних копалин відкритим способом, підвищення ефективності підготовки масиву порід до виймання пов'язане з оптимізацією параметрів БПР. Особливо складним є процес руйнування масивів, що представлені міцними породами розкриву та рудою, де енерговитрати на подрібнення є максимальними. Оскільки якість підготовки гірничої маси впливає на продуктивність усього технологічного ланцюга: виймально-навантажувальні роботи – транспортування – первинне дроблення. Водночас значне зростання собівартості видобутку залежить від якості подрібнення, виходу негабариту та нерівномірності фракцій.

Варто зазначити, що традиційні методики визначення параметрів БПР орієнтовані на врахуванні геометричних характеристик уступу та фізико-механічних властивостей порід, що їх складають. Проте ключовим параметром, що визначає енергоємність процесу та ступінь подрібнення є ЛНО по підшві уступу. Саме ця величина визначає об'єм породи, що припадає на один свердловинний заряд і вектор переважного переміщення гірничої маси. У більшості класичних формул основна увага приділяється діаметру заряду та міцності породи. Водночас детонаційні характеристики вибухової речовини (ВР) не враховуються, або ж опосередковано через перевідні коефіцієнти відносної працездатності. Використання сучасних емульсійних або сумішевих ВР потребує удосконалення базових методик і моделей розрахунку ЛНО по підшві уступу. Відсутність прямого врахування детонаційного тиску призводить до похибок у прогнозуванні зони регульованого тріщиноутворення. В умовах підготовки міцних порід до виймання це призводить до неналежної якості дроблення підшви уступу або перевитрати ВР.

**Формулювання невирішеної частини проблеми.** Аналіз досліджень вітчизняних та зарубіжних вчених у галузі руйнування міцних порід вибухом свідчить про поступовий перехід від емпіричних моделей до детермінованих розрахунків, в основу яких покладено енергетичний баланс системи «заряд ВР-масив порід». Питання встановлення оптимальної ЛНО по підшві уступу є актуальним, оскільки саме цей параметр визначає ефективність використання енергії вибуху.

Традиційні підходи, що використовуються на кар'єрах України і зарубіжжя, часто базуються на розрахунку ЛНО по підшві уступу як функції свердловини та міцності породи, що не повністю враховують динаміку розширення продуктів детонації [1]. Зокрема, ігнорування швидкості детонації може призвести до значних похибок у прогнозуванні виходу негабариту та неякісного дроблення підшви уступів.

Дослідження параметрів БПР на кар'єрах Австралії та Індії, свідчить, що енергетична складова ЛНО по підшві уступу є критичною у разі використання сучасних ВР. Так, у роботі [2] доведено, що за однакового діаметра свердловини використання ВР з вищим детонаційним тиском дозволяє збільшувати значення ЛНО по підшві уступу до 10–15 % без погіршення якості дроблення. Результати виконаних досліджень свідчать про те, що ЛНО по підшві уступу необхідно розглядати як динамічний параметр, який залежить від термодинамічних характеристик вибуху.

Питання врахування детонаційних характеристик розглядається у процесі руйнування тріщинуватих масивів. Автор дослідження [3] зазначає, що в зонах за межею інтенсивного тріщиноутворення основну роль відіграє квазістатичний тиск газів. У разі якщо величина ЛНО по підшві уступу не враховує об'єм газоподібних продуктів та їхню температуру, це призводить до передчасного скидання тиску через природні тріщини.

Питання оптимізації БПР на гранітних кар'єрах детально розглянуто в роботі [4]. Авторами встановлено, що у разі переходу на змішані типи ВР величина ЛНО по підшві уступу потребує корегування через зміну імпульсу вибуху. Недоліком існуючих моделей вони називають відсутність прямого зв'язку між параметром ЛНО по підшві уступу та акустичним імпедансом між ВР і породою.

Практичне застосування уточнених розрахунків на діючих об'єктах, зокрема на кар'єрах компанії Rio Tinto, досліджено в роботі [5]. Дослідження показали, що інтеграція швидкості детонації у функцію розрахунку ЛНО по підшві уступу дозволила зменшити питомі витрати ВР на 8 % за умови збереження проектного профілю розвалу. Аналогічні результати отримані на кар'єрах Центральної Азії [6], де врахування фактичної швидкості детонації в свердловині дозволило скоригувати значення ЛНО по підшві уступу в бік збільшення, що суттєво знизило обсяги буріння.

Дослідження впливу енергетичних параметрів на зону руйнування [7] акцентуються на тому, що за зоною тріщиноутворення руйнування відбувається переважно завдяки напруженням зсуву. Якщо в розрахунку ЛНО по підшві уступу відсутній показник бризантності ВР, енергія вибуху розподіляється нерівномірно. Отже, встановлення величини ЛНО по підшві уступу з урахуванням радіуса зони тріщиноутворення залежно від діаметра свердловини, детонаційних характеристик ВР та фізико-механічних властивостей масиву, для руйнування міцних порід на кар'єрах має актуальне значення.

**Формулювання мети та завдань дослідження.** Аналіз попередніх напрацювань з обґрунтування параметрів БПР дозволив сформулювати мету дослідження, що полягає у встановленні величини радіуса зони тріщиноутворення з урахуванням зони непружних деформацій для обґрунтування параметрів БПР у процесі руйнування міцних порід на кар'єрах.

Для досягнення поставленої мети вирішені такі завдання:

- проведено чисельне моделювання за допомогою метода скінченних елементів (МСЕ) формування зони непружних деформацій в масиві порід навколо свердловини під дією вибухового навантаження;
- встановлено параметри зони тріщиноутворення для монолітного нетріщинуватого масиву гірських порід залежно від діаметра свердловини, тиску продуктів вибуху в точці Чепмена-Жуге та межі міцності порід на зсув;
- встановлено закономірність розрахунку величини ЛНО по підшві уступу з урахуванням діаметра свердловини, детонаційних характеристик ВР і фізико-механічних властивостей масиву порід;
- проведено порівняння величини ЛНО по підшві уступу, розрахованою за зоною тріщиноутворення, з фактичними значеннями в умовах реального об'єкта.

**Методика та матеріали досліджень.** Одним із найперспективнішим напрямом дослідження механізму руйнування гірських порід вибухом є чисельне моделювання на основі МСЕ, який сьогодні належить до найбільш розвинених і ефективних інструментів, що дозволяє максимально наблизити до реальності відтворення фізичних процесів [8, 9]. Чисельне моделювання дає змогу досліджувати процеси, проведення яких у натурних умовах є складним або економічно недоцільним [10]. Водночас, попри розвиток математичного апарату та комп'ютерних технологій, кількість програмних продуктів, що здатні достовірно моделювати руйнування масиву гірських порід під час його вибухового навантаження, залишається обмеженою.

Провідні позиції у цій сфері займають ANSYS [11] та SolidWorks [12], які використовують МСЕ та широко застосовуються в гірництві для аналізу зміни напруженого-деформованого стану масиву гірських порід у процесі дії гірського тиску [12] та вибуху [13]. Для вирішення задач динаміки вибуху переважно використовують модулі Autodyn і Explicit Dynamics програмного продукту ANSYS, однак їх застосування потребує високопродуктивного обладнання та значного часу розрахунку. Як відомо з курсу опору матеріалів динамічний розрахунок можна замінити статичним, якщо врахувати динамічний коефіцієнт. Тому, для проведення чисельного моделювання щодо встановлення величини зон непружних деформацій, що утворюються в масиві порід під час вибуху свердловинного заряду ВР, будемо використовувати ліцензійний програмний продукт системи інженерного аналізу SolidWorks Simulation, що має Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Як відомо, система інженерного аналізу SolidWorks Simulation у процесі вирішення статистичних задач витрачає менше часу на проведення одного обчислювального експерименту та є набагато простіша до постановки задачі ніж розвинений пакет ANSYS.

Отже, метою проведення чисельного моделювання є встановлення радіуса тріщиноутворення за величиною зони непружних деформацій під час підривання свердловинного заряду, залежно від діаметра свердловини, тиску продуктів вибуху та межі міцності порід на стискання, що дозволить обґрунтувати раціональні параметри буропідричних робіт у процесі підготовки блоку до виймання та транспортування гірничої маси. Методика моделювання МСЕ зон непружних деформацій із використанням програмного продукту SolidWorks Simulation містить виконання таких етапів:

- ідентифікація моделі;
- формування вихідних даних для створення геометрії моделі;
- вихідні данні матеріалу моделі;
- встановлення навантаження, обмежень та сітки моделі;
- проведення обчислювального експерименту щодо визначення величини зон непружних деформацій, які утворюються в масиві порід під час їх вибухового навантаження.

Ідентифікація моделі виконана шляхом вирішення зворотної задачі для умов нетріщинуватого масиву, що відповідає лінійному ізотропному типу моделі.

Особливістю ідентифікації є відтворення зон непружних деформацій, що виникають у нетріщинуватому масиві порід навколо свердловини під дією тиску продуктів вибуху, за якими встановлювали радіус зони тріщиноутворення (класичний підхід з відтворенням схеми «модель-об'єкт» під час дії вибуху майже неможливий).

Відповідно до другого етапу моделювання будували геометрію моделі згідно з розрахунковою схемою, що подано на рис. 1. Для встановлення величини зони непружних деформацій, яка сформується в масиві гірських порід під час підривання свердловинного заряду, а також запобіганню виникнення крайових ефектів були прийняті параметри геометрії моделі, що подано в табл. 1.

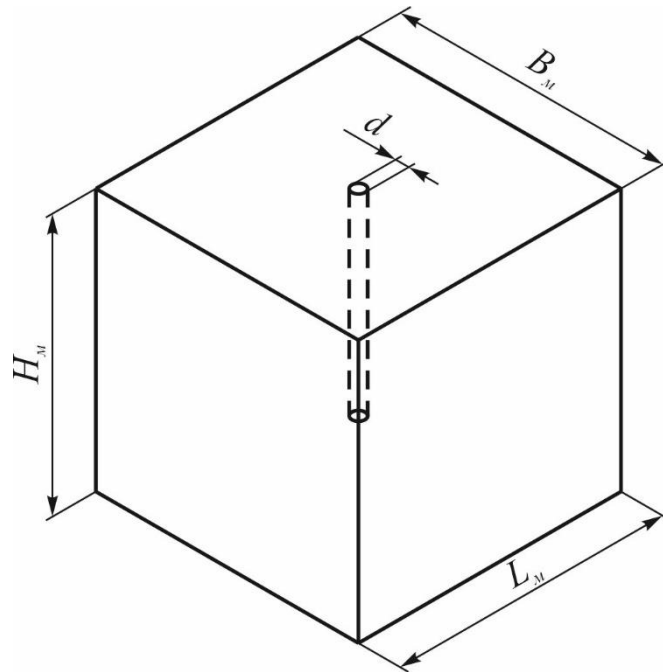


Рис. 1. Розрахункова схема геометричних розмірів моделі

Таблиця 1

Параметри геометрії моделі для проведення чисельного моделювання

Ширина моделі, $B_m$ , м	Висота моделі, $H_m$ , м	Довжина моделі, $L_m$ , м	Діаметр свердловини, $d$ , м	Довжина свердловини, $l_{св}$ , м
20	20	20	0,20; 0,25; 0,30	10

Вихідні дані матеріалу моделі були прийняті такі, що відповідали фізико-механічним властивостям гірських порід кар'єру. Середні значення показників фізико-механічних властивостей гірських порід, представлено в табл. 2.

Так, як вибух являє собою удар, а потім дію тиску продуктів вибуху [14], тому для імітації цього процесу створювали тиск, який направлений перпендикулярно граням і вибою свердловині, водночас необхідно враховувати динамічний коефіцієнт [15]. Величина тиску продуктів вибуху у свердловині [16] визначається за виразом

$$P_m = \frac{\rho \cdot D^2 \cdot K_d}{8}, \text{ Па}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність ВР, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  – швидкість детонації ВР, м/с;  $K_d$  – динамічний коефіцієнт, що дорівнює 2.

Таблиця 2

Прийняті значення фізико-механічних властивостей матеріалу моделі

Показник	Величина		
Модуль пружності, $\times 10^{10}$ Па	10	15	20
Коефіцієнт Пуассона	0,25	0,25	0,25
Модуль зсуву, $\times 10^{10}$ Па	4	6	8
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	2650	3150	3400
Межа міцності на розтягання, $\times 10^6$ Па	10	15	20
Межа міцності на стискання, $\times 10^6$ Па	100	150	200
Межа міцності на зсув, $\times 10^6$ Па	15,8	23,7	31,6

Відповідно до наступного етапу моделювання встановлювали навантаження, обмеження та сітку моделі (рис. 2).

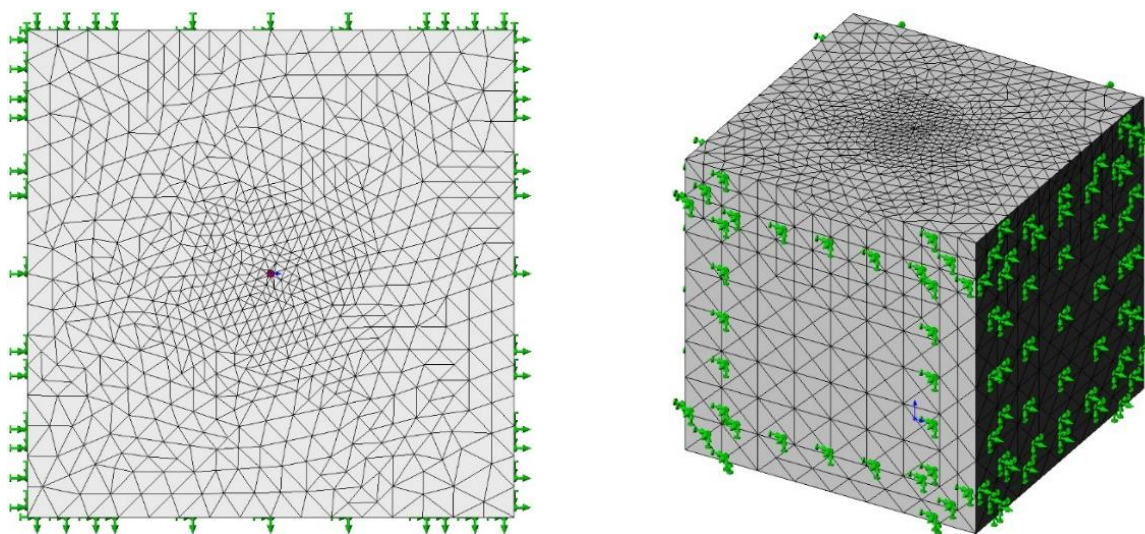


Рис. 2. Сітка скінченних елементів у масиві моделі, обмеження та навантаження

Обчислювальний експеримент зі встановлення зони непружних деформацій в масиві моделі під дією вибуху свердловинного заряду ВР виконували у такій послідовності [17]. Спочатку за розрахованими параметрами викреслювали саму геометрію моделі зі свердловиною згідно зі схемою, що представлена на рис. 1 та розмірами, значення яких подано в табл. 1. Далі у середовищі SolidWorks Simulation обирали новий статистичний аналіз. Потім встановлювали матеріал моделі з фізико-механічними властивостями, що представлено у табл. 2. У ролі критерію руйнування масиву руди застосовували критерій Кулона-Мора, який

застосовується для матеріалів, що по-різному реагують на розтягання та стискання. Після чого фіксувалась сама геометрія моделі. Далі встановлювали тиск продуктів вибуху у свердловині за всією її довжиною. Щоб виключити вплив величини недозаряду на результати експерименту його не враховували. Потім створювали сітку моделі на підставі кривизни з високою щільністю, як подано на рис. 2. Далі запускали обчислювальну програму для поточного дослідження. Визначення зони непружних деформацій, що сформується в масиві моделі навколо свердловини під дією вибуху визначали за запасом міцності. Для цього обрали команду визначення епюри перевірки запасу міцності та у новому вікні встановлювали напруження Кулона-Мора й обирали запас міцності, значення якого  $\leq 1$ . Червоні ділянки в масиві моделі навколо свердловини вказують на місце утворення зони непружних деформацій, в яких масив моделі буде руйнуватися під дією вибухового навантаження.

**Результати досліджень.** Як відомо, якість подрібнення порід за допомогою БПР у процесі підготовки блока до виймання та транспортування гірничої маси, залежить від багатьох чинників, а саме: конструкції заряду ВР, схеми розташування свердловин у блоці, типу ВР тощо. На параметри БПР істотно впливає величина зони непружних деформацій в масиві порід навколо свердловини, що сформується під дією вибуху. Тому, встановлення значення радіуса тріщиноутворення за величиною зони непружних деформацій під час підривання свердловинного заряду ВР виконували для таких гірничо-геологічних умов: діаметр свердловини 0,20 м, 0,25 м і 0,30 м; довжина свердловини – 10 м; межа міцності порід на стискання – 100 МПа, 150 МПа та 200 МПа; тиск продуктів вибуху у точці Чепмена-Жуге – 3000 МПа, 6000 МПа і 9000 МПа. Як приклад розглянемо формування зони непружних деформацій в масиві матеріалу моделі у процесі підривання свердловинного заряду ВР, що подано на рис. 3.

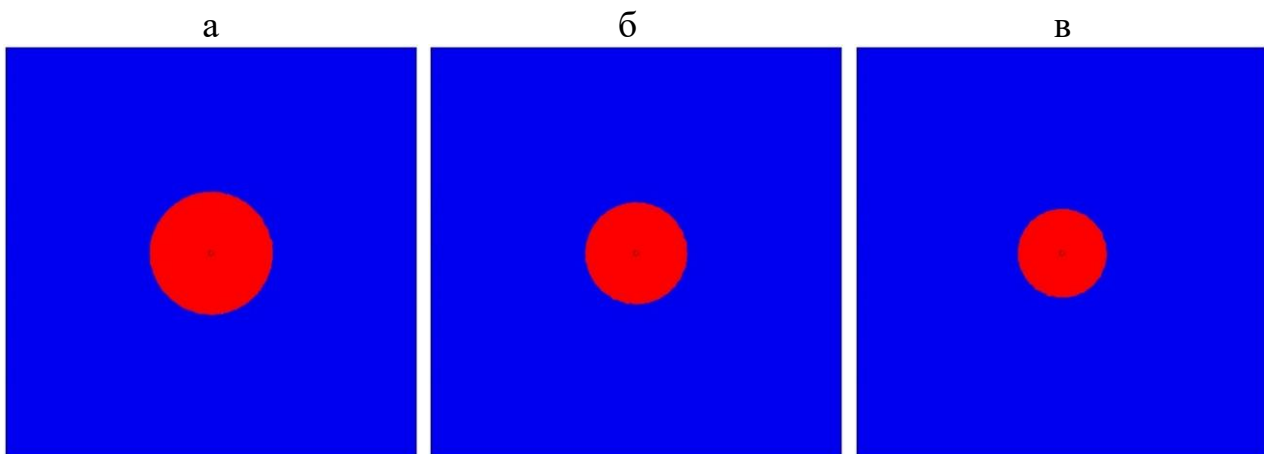


Рис. 3. Формування зон непружних деформацій навколо свердловини діаметром 0,25 м в масиві моделі з межею міцності на стискання  $\sigma_{cm} = 100$  МПа (а),  $\sigma_{cm} = 150$  МПа (б) і  $\sigma_{cm} = 200$  МПа (в), коли тиск продуктів вибуху в точці Чепмена-Жуге  $P_{CJ} = 6$  ГПа

Результати дослідження величини радіуса зони тріщиноутворення у процесі підривання свердловинного заряду ВР, подано в табл. 3.

Таблиця 3

Величина радіуса зони тріщиноутворення  
у процесі підривання свердловинного заряду ВР

Межа міцності порід на стискання, $\sigma_{cm}$ , МПа	Межа міцності порід на зсув, $\tau_3$ , МПа	Діаметр свердловини, $d$ , м		
		0,20	0,25	0,30
Тиск у точці Чепмена-Жуге, $P_{CJ} = 3000$ МПа				
100	15,8	1,75	2,20	2,65
150	23,7	1,45	1,80	2,20
200	31,6	1,30	1,60	1,90
Тиск у точці Чепмена-Жуге, $P_{CJ} = 6000$ МПа				
100	15,8	2,45	3,00	3,60
150	23,7	2,00	2,50	3,00
200	31,6	1,75	2,20	2,65
Тиск у точці Чепмена-Жуге, $P_{CJ} = 9000$ МПа				
100	15,8	2,95	3,60	4,30
150	23,7	2,45	3,00	3,60
200	31,6	2,10	2,65	3,15

Провівши апроксимацію максимальних значень (табл. 3), отримано емпіричну формулу розрахунку величини радіуса зони тріщиноутворення для монолітного нетріщинуватого масиву гірських порід залежно від діаметра свердловини, тиску продуктів вибуху в точці Чепмена-Жуге та межі міцності порід на зсув, яка має вигляд

$$R_{mp} = 20 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{P_{CJ}}{\tau_3}}, \text{ м, при } R^2 = 0,979, \quad (2)$$

де  $d$  – діаметр свердловини, що дорівнює 0,2–0,3 м;  $P_{CJ}$  – тиск продуктів вибуху в точці Чепмена-Жуге, що дорівнює 3–9 ГПа;  $\tau_3$  – межа міцності порід на зсув, МПа;  $R^2$  – величина достовірності апроксимації.

Залежно від генезису масив гірських порід, порушений системами випадково орієнтованих тріщин різного ступеня розкриття, характеризується певною структурою та текстурою. Унаслідок цього показники міцності порід у лабораторному зразку та в природному масиві істотно різняться. Зниження міцності, спричинене тріщинуватістю, кількісно характеризується коефіцієнтом структурного ослаблення масиву. З метою підвищення точності визначення радіуса зони тріщиноутворення у тріщинуватих породах до емпіричної формули (2) доцільно ввести коефіцієнт структурного ослаблення масиву, що врахує їх природню тріщинуватість. Тоді, формула (2) прийме вигляд

$$R_{mp} = 20 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{P_{CJ}}{\tau_3 \cdot K_c}}, \text{ м}, \quad (3)$$

де  $K_c$  – коефіцієнт структурного ослаблення масиву, який можна розрахувати за однією з формул, що подано в роботі [15].

Тиск продуктів вибуху в точці Чепмена-Жуге визначається за формулою [18]

$$P_{CJ} = \frac{\rho \cdot D^2}{4}, \text{ ГПа}, \quad (4)$$

де  $\rho$  – щільність ВР, г/см<sup>3</sup>;  $D$  – швидкість детонації ВР, км/с.

Основні характеристики міцності гірських порід, такі як межі міцності на стискання, розтягання та зсув пов'язані між собою наступним співвідношенням [15]

$$\tau_3 = 0,5 \cdot \sqrt{\sigma_{cm} \cdot \sigma_p}, \text{ МПа}, \quad (5)$$

де  $\sigma_{cm}$  – межа міцності порід на стискання, МПа;  $\sigma_p$  – межа міцності порід на розтягання, МПа.

Підставивши формули (4) і (5) у вираз (3) та виконавши необхідні перетворення отримуємо формулу розрахунку величини радіуса зони тріщиноутворення з урахуванням діаметра свердловини, щільності та швидкості детонації ВР, межі міцності порід на розтягання-стискання та їх тріщинуватості, яка має вигляд

$$R_{mp} = 10 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot D^2}{K_c \cdot (\sigma_{cm} \cdot \sigma_p)^{0,5}}}, \text{ м}. \quad (6)$$

Основними параметрами БПР, за якими будується сітка свердловин, є ЛНО по підшві уступу, відстань між рядами свердловин та між свердловинами у ряді. Проф. Г.Й. Покровський зазначив, що максимальна глибина закладання заряду ВР за якої ще можливе подрібнення у зовнішній зоні, дорівнює двом радіусам зони тріщиноутворення. На підставі зазначеного ЛНО по підшві уступу пропонується визначати за формулою

$$W = 2 \cdot R_{mp} = 20 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho \cdot D^2}{K_c \cdot (\sigma_{cm} \cdot \sigma_p)^{0,5}}}, \text{ м}. \quad (7)$$

Розрахункова величина ЛНО по підшві уступу  $W$  повинна забезпечувати безпечну відстань  $W_6$  від бурового станка до верхньої бровки уступу, яка визначається за формулою

$$W_6 = H_y \cdot \text{ctg} \alpha + C, \text{ м}, \quad (8)$$

де  $H_y$  – висота уступу, м;  $\alpha$  – кут укосу уступу, град;  $C$  – відстань від верхньої кромки уступу до свердловини першого ряду, з метою безпеки приймають  $C \geq 3$  м.

Водночас проф. Г.Й. Покровський зазначив, що подовжені заряди ВР у разі спільного підривання повинні діяти як плоский заряд тому їх потрібно розташувати на відстані один від одного, що визначається за виразом

$$a = 1,57 \cdot R_{mp}, \text{ м}, \quad (9)$$

Відстань між рядами розраховується за формулою

$$b = (0,8 - 1,0)W, \text{ м}. \quad (10)$$

Коефіцієнт зближення зарядів визначається за співвідношенням

$$m = a / W. \quad (11)$$

Для перевірки придатності формули (7) до розрахунку ЛНО по підшві уступу, проведемо порівняння зі значеннями ЛНО в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК». Розрахунок величини ЛНО по підшві уступу проводили для таких вихідних даних: висота уступу – 12 м; діаметр свердловини – 0,25 м та її довжина – 14 м; ВР – емульсійна ВР типу Анемікс Р-70, щільністю 1,25 г/см<sup>3</sup> та швидкістю детонації 5,5–5,7 км/с; породи малотріщинуваті з межею міцності на стискання 100–200 МПа. За результатами розрахунку отримано графіки залежності зміни величини фактичної та розрахованої ЛНО по підшві уступу від межі міцності на стискання порід, що подано на рис. 4.



Рис. 4. Графіки залежності зміни величини фактичної та розрахованої ЛНО по підшві уступу від межі міцності на стискання порід

Аналізом значень фактичної та розрахованої ЛНО по підшві уступу від межі міцності на стискання порід (див. рис. 4) встановлено, що розбіжність значень коливається в межах +3 % – -9 %, що вказує на придатність формули (7) для розрахунку величини ЛНО по підшві уступу. Подальшим аналізом результатів встановлено, що фактичні значення ЛНО по підшві уступу для порід з межею міцності на стискання 110–150 МПа, є завищеними до 9 %, що може призвести

до виходу негабаритних кусків породи та додаткових витрат на вторинне подрібнення. Для порід з межею міцності на стискання в межах 160–200 МПа, величину ЛНО по підосві уступу можна збільшити до 3 %, що дозволить розширити сітку свердловин та зменшити витрати на підготовку блоку до виймання та транспортування гірничої маси.

**Висновки.** Чисельним моделюванням за допомогою МСЕ величини зони непружних деформацій під час підривання свердловинного заряду отримано емпіричну формулу розрахунку величини радіуса зони тріщиноутворення для монолітного нетріщинуватого масиву гірських порід залежно від діаметра свердловини, тиску продуктів вибуху в точці Чепмена-Жуге та межі міцності порід на зсув. Встановлено, що радіус зони тріщиноутворення в масиві гірських порід під час підривання заряду ВР, прямо пропорційний діаметру свердловини та квадратному кореню тиску продуктів вибуху в точці Чепмена-Жуге й обернено пропорційний кореню квадратному від межі міцності породи на зсув.

Подальшими дослідженнями встановлена степенева залежність розрахунку величини ЛНО по підосві уступу залежно від діаметра свердловини, щільності та швидкості детонації ВР, меж міцності порід на розтягання-стискання та їх тріщинуватості. Встановлено, що ЛНО по підосві уступу прямо пропорційна діаметру свердловини і квадратному кореню добутку щільності та швидкості детонації ВР, і обернено пропорційний кореню квадратному від добутку межі міцності породи на стискання та розтягання, і коефіцієнта структурного ослаблення масиву.

Для умов ПрАТ «Полтавський ГЗК» аналізом значень фактичної та розрахункової ЛНО по підосві уступу від межі міцності порід на стискання встановлено, що розбіжність значень коливається в межах +3 % – -9 %, яка вказує на придатність отриманої формули до розрахунку величини ЛНО по підосві уступу. Використання запропонованої емпіричної формули для розрахунку величини ЛНО по підосві уступу дозволить раціоналізувати параметри БПР, зменшити вихід негабаритних кусків породи та призведе до ресурсозбереження під час підготовки блоку до виймання і транспортування гірничої маси.

#### Перелік посилань

1. Fedko, M.B., Muzyka, I.O., Pysmennyi, S.V., & Kalinichenko, O.V. (2019). Determination of drilling and blasting parameters considering the stress-strain state of rock ores. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 37–41. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/20>
2. Couceiro, P. J. C., & Miguel, J. N. (2022). Modelling non-ideal detonations in commercial explosives. *Tecnologia Em Metalurgia, Materiais E Mineração*, 19(1), e2237. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20222237>
3. Zhang, Z. X. (2019). *Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01185-3>
4. Ochilov, S.A. (2025). Optimization of drilling and blasting parameters taking into account the physical and mechanical properties of rocks and characteristics of blast load. *Technical Science and Innovation*, 3, 41–47 <https://doi.org/10.59048/2181-1180.1745>
5. Suryajyoti Nanda, & Naik, H.K. (2023). A Review of the Blast Fragmentation Analysis Techniques used in Surface Mines. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 71(12), 2445–2454. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2023/28601>

6. Rezaeineshat, A., Monjezi, M., Mehrdanesh, A., & Khandelwal, M. (2020). Optimization of blasting design in open pit limestone mines with the aim of reducing ground vibration using robust techniques. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 6(40), 2–14. <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00164-y>
7. Dotto, M. S., & Pourrahimian, Y. (2024). The Influence of Explosive and Rock Mass Properties on Blast Damage in a Single-Hole Blasting. *Mining*, 4(1), 168–188. <https://doi.org/10.3390/mining4010011>
8. Babets, D., Sdvyzhkova, O., Hapieiev, S., Shashenko, O., & Vasyl, V. (2023). Multifactorial analysis of a gateroad stability at goaf interface during longwall coal mining – A case study. *Mining of Mineral Deposits*, 17(2), 9–19. <https://doi.org/10.33271/mining17.02.009>
9. Moldabayev, S.K., Sdvyzhkova, O.O., Babets, D.V., Kovrov, O.S., & Adil, T.K. (2021). Numerical simulation of the open pit stability based on probabilistic approach. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 29–34. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/029>
10. Aitkazinova, S., Sdvyzhkova, O., Imansakipova, N., Babets, D., & Klymenko, D. (2022). Mathematical modeling the quarry wall stability under conditions of heavily jointed rocks. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 18–24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/018>
11. Smoliński, A., Malashkevych, D., Petlovanyi, M., Rysbekov, K., Lozynskiy, V., & Sai, K. (2022). Research into Impact of Leaving Waste Rocks in the Mined-Out Space on the Geomechanical State of the Rock Mass Surrounding the Longwall Face. *Energies*, 15(24), 9522. <https://doi.org/10.3390/en15249522>
12. Petlovanyi, M., Lozynskiy, V., Saik, P., & Sai, K. (2019). Predicting the producing well stability in the place of its curving at the underground coal seams gasification. *E3S Web of Conferences*, 123, 01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301019>
13. Lapčević, V., Torbica, S., Stojanović, M., & Vojinović, I. (2023). Development and Validation of Universal 3D Blast Fragmentation Model. *Applied Sciences*, 13(14), 8316. <https://doi.org/10.3390/app13148316>
14. Persson, P.-A., Holmberg, R., & Lee, J. (2018). *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203740514>
15. Kononenko, M., & Khomenko, O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining of Mineral Deposits*, 15(2), 111–123. <https://doi.org/10.33271/mining15.02.111>
16. Torbica, S., & Lapčević, V. (2015). Estimating extent and properties of blast-damaged zone around underground excavations. *Rem: Revista Escola de Minas*, 68(4), 441–453. <https://doi.org/10.1590/0370-44672015680062>
17. Kononenko, M., Khomenko, O., Kosenko, A., Myronova, I., Bash, V. & Pazynich, Yu. (2024). Raises advance using emulsion explosives. *E3S Web of Conferences*, 526, 01010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452601010>
18. Zukas, J.A., & Walters, W.P. (1998). *Explosive Effects and Applications*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0589-0>

#### ABSTRACT

**Purpose.** Determination of the radius of the crack formation zone taking into account the zone of inelastic deformations to justify the parameters of drilling and blasting operations (D&B) in the process of destruction of hard rocks in open-pit mines and quarries.

**The methodology.** A study to determine the radius of the crack formation zone based on the size of the inelastic deformation zone by changing the stress-strain state of the rock mass around the borehole charge under the action of an explosion was carried out using numerical simulation using finite elements in the SolidWorks Simulation software package. Based on the obtained crack formation zone radius and classical hydrodynamic detonation theory, a numerical model was developed for calculating the line of least resistance (LLR) along the bench toe. The validity of the developed model was confirmed by comparing the calculated LLR values with actual data under real open-pit mines and quarries conditions.

**Findings.** An empirical formula for calculating the radius of the crack formation zone in a unfractured monolithic rock mass was obtained based on the results of numerical simulation of the inelastic deformation zone during blasting of the blasthole charge. A power-law dependence of the value of the LLR along the bench toe on the borehole diameter, the density and detonation velocity of the explosive, the tensile-compressive strength of the rocks, and the degree of their fracturing has been established. The difference between the calculated and actual values of the LLR along the bench toe ranges from +3% to -9%. A method of the D&B parameters for hard rocks fragmentation in open-pit mines and quarries is proposed.

**The originality.** For the first time, a power-law dependence has been established for calculating the LLR along the bench toe on the radius of the crack formation zone, which comprehensively takes into account the borehole diameter, the density and detonation velocity of explosive, the tensile-compressive strength limits of rocks and their fracturing, which ensures a more accurate calculation of the D&B parameters for the hard rocks fragmentation in open-pit mines and quarries.

**Practical implications.** The developed methodology allows for the determination of D&B rational parameters for the effective hard rocks fragmentation in open-pit mines and quarries, thereby reducing blasting operations.

**Keywords:** *hard rocks, borehole, explosive, crack formation zone, line of least resistance along the bench toe.*

дата першого надходження статті до видання	10.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	12.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026